



João Paulo Fernandes da Silva

**PROJETO E ANÁLISE DE ANTENAS *PATCH* COM
ELEMENTOS POLARES E RESPOSTA MULTIBANDA**

João Pessoa - PB

Março de 2018



JOÃO PAULO FERNANDES DA SILVA

**PROJETO E ANÁLISE DE ANTENAS *PATCH* COM
ELEMENTOS POLARES E RESPOSTA MULTIBANDA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Paulo Henrique da Fonseca Silva, Dr.

Orientador

João Pessoa – PB

Março de 2018

© João Paulo Fernandes da Silva – jpfs.ifpb@gmail.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

S586p Silva, João Paulo Fernandes da.
Projeto e análise de antenas patch com elementos polares
e resposta multibanda / João Paulo Fernandes da Silva. – 2018.
82 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto
Federal da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, 2018.

Orientador: Profº Paulo Henrique da Fonseca Silva.

1. Antenas. 2. Antenas de microfita. 3. Antenas patch. 4.
Antenas multibanda. 5. Elementos polares. I. Título.

CDU 621.396.67

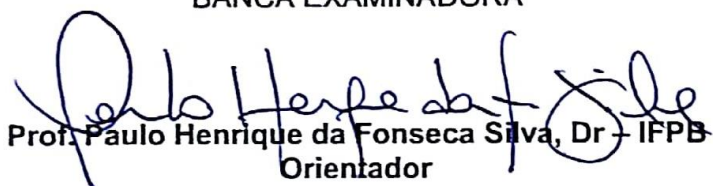
Ivanise Andrade M. de Almeida
Bibliotecária-Documentalista
CRB-15/0096


PROJETO E ANÁLISE DE ANTENAS *PATCH* COM ELEMENTOS POLARES E RESPOSTA MULTIBANDA

Dissertação de Mestrado submetida
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba, como
requisito necessário à obtenção do
grau de Mestre em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.

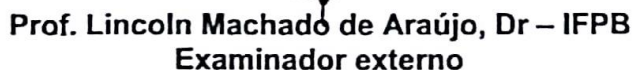
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 29/03/2018

BANCA EXAMINADORA


Prof. Paulo Henrique da Fonseca Silva, Dr – IFPB
Orientador


Prof. Alfredo Gomes Neto, Dr – IFPB
Examinador interno


Prof. Jefferson Costa e Silva, Dr – IFPB
Examinador interno


Prof. Lincoln Machado de Araújo, Dr – IFPB
Examinador externo


Prof. Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira, Dr – UEPB
Examinador externo

João Pessoa – PB

Março de 2018

À minha mãe, aos meus tios, afilhado e à minha namorada.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe Janete, que tanto batalhou para criar e educar seus filhos, aos meus tios Josineide e Márcio, pelo acolhimento, incentivo e apoio incondicional.

À minha namorada Ália, pelo amor, companheirismo e incentivo.

Aos meus amigos, em especial a Benjamim, pela amizade, conselhos e incentivo.

A todos que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho, especialmente ao meu orientador Paulo Henrique, pela paciência e ensinamentos durante o curso.

Aos professores do programa, pelos ensinamentos.

Aos amigos Maciel e Paulo Fernandes, pelos ensinamentos passados na área de antenas durante o mestrado.

Aos meus amigos que conquistei no mestrado, aprendi muito com cada um de vocês.

Ao IFPB - Campus João Pessoa, pelo incentivo financeiro ofertado através da bolsa de mestrado.

RESUMO

Esta Dissertação descreve o projeto e a análise de antenas de microfita do tipo *patch* com elementos polares e resposta multibanda. Uma dessas antenas é bioinspirada na flor de Anêmona e foi fabricada utilizando o *jeans* como substrato para aplicações vestíveis em 3,5 e 5,8 GHz. As antenas propostas são definidas por equações em coordenadas polares e desenvolvidas com auxílio de ferramentas de CAD (*Computer-Aided Design*) a partir de uma antena *patch* circular convencional. As equações polares são implementadas em MATLAB® e exportadas para o Ansoft Designer®, *software* utilizado para a simulação das antenas abordadas. Com esta metodologia adotada e através de análises paramétricas, a resposta multibanda é avaliada para quatro tipos diferentes de elementos polares em função do raio e do número de pétalas. Verifica-se que as propriedades ressonantes das antenas *patch* propostas estão diretamente relacionadas ao número de pétalas dos elementos irradiantes com formatos definidos por equações em coordenadas polares. As propriedades ressonantes e de irradiação das antenas abordadas são apresentadas. Os resultados experimentais são obtidos a partir da medição de protótipos fabricados e estão em boa concordância com os resultados de simulação.

Palavras-Chave: Antenas de microfita, antenas *patch*, antenas multibanda, elementos polares.

ABSTRACT

This dissertation describes the design and analysis of microstrip patch antennas with polar elements and multiband response. One of these antennas is bio-inspired on the Anemone flower and was fabricated using jeans as a substrate for wearable applications in 3.5 and 5.8 GHz. The proposed antennas are defined by equations in polar coordinates and developed with the help of Computer-Aided Design (CAD) tools from a conventional circular patch antenna. The polar equations are implemented in MATLAB® and exported to Ansoft Designer®, software used to simulate the antennas addressed. With this methodology adopted and through parametric analysis, the multiband response is evaluated for four different types of polar elements as a function of radius and number of petals. It is verified that the resonant properties of the proposed patch antennas are directly related to the number of petals of radiating elements with formats defined by equations in polar coordinates. The resonant and irradiation properties of the antennas discussed are presented. The experimental results are obtained from the measurement of manufactured prototypes and are in good agreement with the simulated results.

Keywords: Microstrip antennas, patch antennas, multiband antennas, polar elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Antena de microfita do tipo <i>patch</i>	17
Figura 2 – Tipos de elementos <i>patch</i> irradiantes. Adaptado de [24].	17
Figura 3 – Técnicas de alimentação por linha de microfita para antena <i>patch</i> circular: a) linha de microfita simples; b) <i>inset-fed</i> ; c) transformador de quarto de onda; d) híbrida. Adaptado de [7].	18
Figura 4 – Antena com elemento <i>patch</i> circular.	21
Figura 5 – Largura de banda considerando o módulo do coeficiente de reflexão.	23
Figura 6 – Sistema de coordenadas polares.	29
Figura 7 – Gráficos de equações polares envolvendo funções seno e cosseno: a) borboleta; b) borboleta com antenas; c) cardioide; d) rosácea de 4 pétalas; e) duas asas de borboleta; f) libélula [10].	30
Figura 8 – Antena <i>patch</i> circular.....	33
Figura 9 – Quatro variações do parâmetro m para o <i>patch</i> da antena de Gielis #1.	33
Figura 10 – Antena de Gielis #1 com quatro pétalas.....	34
Figura 11 – Quatro variações do parâmetro m para o <i>patch</i> da antena de Gielis #2.	34
Figura 12 – Antena de Gielis #2 com quatro pétalas.....	35
Figura 13 – Quatro variações do parâmetro m para o <i>patch</i> da antena de Gielis #3.	35
Figura 14 – Antena de Gielis #3 com quatro pétalas.....	36
Figura 15 – Quatro variações do parâmetro m para <i>patch</i> bioinspirado na flor de Lótus.	37
Figura 16 – Antena com <i>patch</i> bioinspirado na flor de Lótus: a) flor de Lótus; b) <i>patch</i> bioinspirado; c) antena flor de Lótus com doze pétalas; d) antena flor de Lótus com quatro pétalas.....	37
Figura 17 – Antena vestível bioinspirada na flor Anêmona: a) flor Anêmona; b) antena bioinspirada na flor Anêmona.	38
Figura 18 – Laminado adesivo de cobre.	39
Figura 19 – Arranjo de medição usado para caracterização experimental do <i>jeans</i>	40
Figura 20 – Permissividade elétrica relativa do <i>jeans</i>	40
Figura 21 – Tangente de perdas do <i>jeans</i>	41
Figura 22 – Protótipo da antena vestível: a) elemento <i>patch</i> ; b) plano de terra.	41
Figura 23 – <i>Setup</i> da caracterização experimental da antena com substrato <i>jeans</i>	42

Figura 24 – Arranjo de medição usado para caracterização experimental de uma antena <i>patch</i>	43
Figura 25 – Resultados simulado e medido do parâmetro $ S_{11} $ da antena circular...44	44
Figura 26 – Resultados simulado e medido da primeira frequência de ressonância da antena circular.....44	44
Figura 27 – Gráfico da impedância de entrada da antena circular medida sobre a Carta de Smith.45	45
Figura 28 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena circular.46	46
Figura 29 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena <i>patch</i> circular.....47	47
Figura 30 – Resultados simulado e medido da primeira frequência de ressonância da antena de Gielis #1.47	47
Figura 31 – Gráfico da impedância de entrada da antena de Gielis #1 medida sobre a Carta de Smith.48	48
Figura 32 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena de Gielis #1.49	49
Figura 33 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena de Gielis #1.50	50
Figura 34 – Resultados simulado e medido da primeira frequência de ressonância da antena de Gielis #2.50	50
Figura 35 – Gráfico da impedância de entrada da antena de Gielis #2 medida sobre a Carta de Smith.51	51
Figura 36 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena de Gielis #2.52	52
Figura 37 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena de Gielis #2.52	52
Figura 38 – Resultados simulado e medido da primeira frequência de ressonância da antena de Gielis53	53
Figura 39 – Gráfico da impedância de entrada da antena de Gielis #3 medida sobre a Carta de Smith.54	54
Figura 40 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena de Gielis #3.54	54
Figura 41 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena de Gielis #3.55	55
Figura 42 – Resultados simulado e medido da primeira frequência de ressonância da antena flor de Lótus.....56	56
Figura 43 – Gráfico da impedância de entrada da antena bioinspirada na flor de Lótus medida sobre a Carta de Smith.....57	57
Figura 44 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena flor de Lótus.57	57

Figura 45 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena flor de Lótus.	58
Figura 46 – Resultados simulado e medido do parâmetro $ S_{11} $ da antena vestível.	59
Figura 47 – Gráfico da impedância de entrada da antena vestível medida sobre a Carta de Smith.	60
Figura 48 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena vestível.	60
Figura 49 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena vestível em 3,51 GHz.	61
Figura 50 – Análise paramétrica da frequência de ressonância para das antenas de Gielis #1.	62
Figura 51 – Análise paramétrica da largura de banda para as antenas de Gielis #1.	63
Figura 52 – Análise paramétrica da frequência de ressonância para as antenas de Gielis #2.	64
Figura 53 – Análise paramétrica da largura de banda para as antenas de Gielis #2.	64
Figura 54 – Análise paramétrica da frequência de ressonância para as antenas de Gielis #3.	65
Figura 55 – Análise paramétrica da largura de banda para as antenas de Gielis #3.	66
Figura 56 – Análise paramétrica da frequência de ressonância para as antenas bioinspiradas na flor de Lótus.	66
Figura 57 – Análise paramétrica da largura de banda para as antenas bioinspiradas na flor de Lótus.	67
Figura 58 – Resultados simulados e medidos do parâmetro $ S_{11} $ para os tipos de <i>patch</i> com 4 pétalas.	68
Figura 59 – Resultados simulados e medidos do parâmetro $ S_{11} $ para os tipos de <i>patch</i> com 12 pétalas.	69
Figura 60 – Resultados simulados e medidos do parâmetro $ S_{11} $ para os tipos de <i>patch</i> com 24 pétalas.	70
Figura 61 – Resultados simulados e medidos do parâmetro $ S_{11} $ para os tipos de <i>patch</i> com 32 pétalas.	71
Figura 62 – Resultados simulados e medidos do parâmetro $ S_{11} $ para os tipos de <i>patch</i> com 32 pétalas.	71
Figura 63 – Análise paramétrica do número de ressonâncias em relação ao número de pétalas dos elementos irradiantes abordados.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de geometrias da superfórmula com $n_1 = -0,5$. Adaptado de [7].	31
Tabela 2 – Dimensões de projeto das antenas propostas (mm).	38
Tabela 3 – Dimensões de projeto da antena bioinspirada na flor Anêmona (mm).	39
Tabela 4 – Dados simulados e medidos da primeira ressonância da antena circular.	45
Tabela 5 – Parâmetros de irradiação da antena circular.	46
Tabela 6 – Dados simulados e medidos da primeira ressonância da antena de Gielis #1.	48
Tabela 7 – Parâmetros de irradiação da antena de Gielis #1.	49
Tabela 8 – Dados simulados e medidos da primeira frequência de ressonância da antena de Gielis #2.	51
Tabela 9 – Parâmetros de irradiação da antena de Gielis #2.	52
Tabela 10 – Dados simulados e medidos da primeira frequência de ressonância da antena de Gielis #3.	53
Tabela 11 – Parâmetros de irradiação da antena de Gielis #3.	55
Tabela 12 – Dados simulados e medidos da primeira frequência de ressonância da antena flor de Lótus.	56
Tabela 13 – Parâmetros de irradiação da antena flor de Lótus.	58
Tabela 14 – Dados simulados e medidos da 1ª e 2ª ressonância da antena vestível.	59
Tabela 15 – Parâmetros de radiação da antena vestível em 3,51 GHz.	61

LISTA DE SIGLAS

BW	– <i>Bandwidth</i> – Largura de banda
CPW	– <i>Coplanar waveguide</i> – Guia de ondas coplanar
DXF	– <i>Drawing exchange format</i> – Formato para troca de desenho
FB	– <i>Front-to-back ratio</i> – Relação frente-costas
GPS	– <i>Global positioning system</i> – Sistema de posicionamento global
HPBW	– <i>Half-power beamwidth</i> – Largura de feixe de meia potência
PIFA	– <i>Planar inverted-F antenna</i> – Antena planar F-invertido
QWT	– <i>Quarter wave transformer</i> – Transformador de quarto de onda
RL	– <i>Return loss</i> – Perda de retorno
UWB	– <i>Ultra wideband</i> – Banda ultralarga
VNA	– <i>Vectorial network analyzer</i> – Analisador de rede vetorial
WLAN	– <i>Wireless local area network</i> – Rede local sem fio
WiMAX	– <i>Worldwide interoperability for microwave access</i> – Interoperabilidade mundial para acesso de micro-ondas

LISTA DE SÍMBOLOS

a	– Raio de um elemento <i>patch</i> irradiante
b	– Largura de linha do transformador de quarto de onda
ϵ_r	– Permissividade elétrica relativa
ϵ_{reff}	– Permissividade elétrica relativa efetiva
f_1	– Frequência de ressonância inferior
f_2	– Frequência de ressonância superior
f_r	– Frequência de ressonância
G_1	– Condutância de um <i>slot</i> de uma antena de <i>patch</i>
G_{12}	– Condutância mútua entre os <i>slots</i> de uma antena <i>patch</i>
h	– Espessura do substrato
L	– Comprimento do elemento irradiante de uma antena de microfita
L_{pt}	– Comprimento do plano de terra
m	– Número de pétalas
R_{in}	– Resistência de entrada do elemento irradiante
t	– Espessura da camada metálica
v_0	– Velocidade da luz no espaço livre
w	– Largura da linha de microfita
W_{pt}	– Largura do plano de terra
x_0	– Largura <i>inset</i>
X_{110}	– Zeros da derivada da função de Bessel para o primeiro modo de propagação
y_0	– Comprimento de <i>inset</i>
Z_{in}	– Impedância de entrada do elemento irradiante
Z_o	– Impedância característica da linha de microfita
Z_L	– Impedância característica da antena
Γ	– Coeficiente de reflexão
θ	– Coordenada polar
λ_0	– Comprimento de onda no vácuo
λ_g	– Comprimento de onda guiado

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	Organização do Texto.....	15
2.	Antenas de Microfita	16
2.1.	Antenas de Microfita do Tipo <i>Patch</i>	16
2.1.1.	Tipos de Alimentação.....	18
2.1.2.	Técnica de Alimentação por Linha de Microfita.....	18
2.2.	Antena de Microfita do Tipo <i>Patch</i> Circular	21
2.2.1.	Frequência de Ressonância.....	22
2.2.2.	Largura de Banda	23
2.3.	Antenas Bioinspiradas	24
2.3.1.	Estado da Arte	24
2.4.	Antenas Vestíveis.....	26
2.4.1.	Estado da Arte	27
3.	METODOLOGIA	29
3.1.	Transformações Polares	29
3.1.1.	Funções Polares	29
3.1.2.	Fórmula de Gielis	30
3.2.	Tipos de Elementos <i>Patch</i> Abordados.....	32
3.2.1.	Elemento <i>Patch</i> Circular.....	32
3.2.2.	Elemento <i>Patch</i> Polar de Gielis #1	33
3.2.3.	Elemento <i>Patch</i> Polar de Gielis #2.....	34
3.2.4.	Elemento <i>Patch</i> Polar de Gielis #3.....	35
3.2.5.	Elemento <i>Patch</i> Bioinspirado na Flor de Lótus	36
3.3.	Antena Vestível	38
4.	RESULTADOS.....	43

4.1.	Antena Circular	43
4.2.	Antena de Gielis #1	47
4.3.	Antena de Gielis #2	50
4.4.	Antena de Gielis #3	53
4.5.	Antena Flor de Lótus	55
4.6.	Antena Vestível	58
4.7.	Análise Paramétrica das Antenas <i>Patch</i> Propostas.....	61
4.8.	Análise Paramétrica do Número de Ressonâncias em Relação ao Número de Pétalas	68
5.	CONCLUSÕES	73
5.1.	Propostas Para Trabalhos Futuros.....	74
	REFERÊNCIAS.....	75

1. INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas de comunicações sem fio demanda cada vez mais o desenvolvimento de circuitos e dispositivos, tais como, filtros e antenas, que buscam atender às especificações destes sistemas para a transmissão de dados nas faixas de radiofrequência e micro-ondas. Com o crescimento do número de usuários de serviços móveis e o tráfego de informações cada vez mais intenso, a demanda por dispositivos que possam operar em mais de uma faixa de frequência simultaneamente, tornou-se maior. Com isso, pesquisadores desta área buscam desenvolver componentes com elementos irradiantes que operem em múltiplas faixas de frequência, que sejam de baixo custo de fabricação, compactos e que possam ser integrados em sistemas de comunicações, principalmente os sem fio [1]-[5].

Componentes desses sistemas que ressoam em mais de uma faixa de frequência, por exemplo, em 2,0 GHz, 3,5 GHz e 5,8 GHz, são dispositivos com tripla operação, ou seja, operação multibanda. Portanto, é possível desenvolver componentes para aplicações em mais de uma tecnologia, simultaneamente [2].

Um dos dispositivos que tem fundamental importância nos sistemas de comunicação, é a antena, que é definida como sendo um dispositivo para a transmissão ou a recepção de ondas eletromagnéticas [6]. As antenas de microfita, tais como, *patch*, monopolo impresso e PIFA (*Planar Inverted-F Antenna*) são exemplos de antenas utilizadas nos sistemas de comunicações sem fio, atualmente.

Dentre estas antenas de microfita, destaca-se a do tipo *patch*, que é formada basicamente por um elemento irradiante impresso sobre um substrato dielétrico e um plano de terra do outro lado. Estas antenas são compactas, de baixo custo de fabricação, adaptáveis às superfícies planas ou curvas, podem assumir qualquer formato de elemento irradiante e são versáteis quanto à polarização, diagrama de irradiação, frequência de ressonância, etc. Com todas essas características, podem ser incorporadas em aeronaves, mísseis, automóveis, telefones celulares, entre outros dispositivos móveis [6].

Os elementos irradiantes das antenas *patch* podem assumir diversas formas, tamanhos e podem ser impressos em diferentes tipos de materiais dielétricos de acordo com suas aplicações. Dentre as geometrias dos elementos irradiantes podem ser destacadas: as euclidianas, com geometrias retangulares, triangulares, circulares, elípticas; bem como, não-euclidianas, com a geometria fractal como principal

referência. Essas geometrias fractais representam uma classe de objetos com formatos autossimilares complexos e foram inspiradas em formas encontradas na natureza [7], [8].

A natureza tem sido fonte de inspiração para muitos projetos de engenharia. Recentemente, engenheiros da área de telecomunicações têm buscado projetar antenas *patch* com elementos irradiantes bioinspirados em plantas [9], folhas [10], flores [11] e até animais [12] na tentativa de associar a capacidade desses seres vivos de captarem a energia solar, à capacidade de captarem ondas eletromagnéticas [13]-[14].

A utilização de elementos irradiantes com formato de rosáceas justifica-se pelo apelo estético proporcionado em aplicações como antenas vestíveis [15], onde a antena pode estar visível na parte externa da vestimenta.

Pesquisadores [7], [10], [16] têm obtido resultados satisfatórios para diferentes aplicações sem fio, tais como, *WLAN* (*Wireless Local Area Network* – Rede Local Sem Fio) e *UWB* (*Ultra-wide-band* – Banda Ultralarga), com antenas bioinspiradas em plantas e animais. Entretanto, quando deseja-se trabalhar com esses formatos não-convencionais, como os fractais ou estruturas bioinspiradas em plantas e animais, o desenho desses formatos não é tão facilmente replicado quanto ao desenho de geometrias euclidianas já predispostas como ferramentas para desenho de projetos na maioria de *softwares* de simulação eletromagnética. O desenho de formatos não-convencionais é limitado nesses *softwares*, tornando-se assim, uma restrição ao seu uso.

Uma alternativa quando se projetam antenas com elementos *patch* bioinspirados ou com formatos curvos, como as usadas em antenas espirais, do tipo *patch* elíptico, Vivaldi, entre outras, é a utilização de equações polares. Seu uso é vantajoso porque sua formulação matemática é relativamente simples, os formatos são gerados por meio de processo iterativo, conforme se altera o número de iterações, altera-se o perímetro da geometria, todavia a área total permanece praticamente constante [7]. O gráfico de uma equação polar $r = f(\theta)$, ou de forma geral $f(r, \theta) = 0$, em que f é uma função definida e contínua em coordenadas polares, consiste em todos os pontos P que tem, pelo menos, uma representação polar (r, θ) [7]. Sendo assim, é possível obter uma infinidade de formas geométricas a partir dessas equações polares.

Nesta dissertação são analisadas as propriedades eletromagnéticas de antenas de microfita do tipo *patch* com elementos irradiantes gerados por equações polares e impressas em dois tipos de substratos. Esta análise é inicialmente realizada no *software* de simulação eletromagnética, Ansoft Designer®, que utiliza o método numérico MoM (*Method of Moments* – Método dos Momentos) [17]. Deste *software*, além dos parâmetros de irradiação, são extraídos os dados de frequências de ressonâncias e de largura de banda das antenas visando a realização de uma análise paramétrica desses parâmetros em relação ao tamanho do raio e do número de pétalas inseridas nos elementos irradiantes. Além disso, uma análise do número de frequências ressonantes em relação ao número de pétalas dos elementos *patch* é realizada.

1.1. Organização do Texto

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre antenas de microfita, antenas do tipo *patch*, antenas bioinspiradas e antenas vestíveis. Também são abordadas formulações teóricas sobre projetos de antenas.

No Capítulo 3 são apresentadas equações polares usadas para o desenho de elementos irradiantes das antenas *patch* propostas, tal como, a superfórmula de Gielis. Em seguida é apresentada a metodologia para o desenvolvimento das antenas do tipo *patch* com elementos irradiantes polares.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados simulados e medidos das antenas impressas no substrato da Hitachi e no substrato *jeans*.

No Capítulo 5 são feitas as conclusões desta Dissertação, além de propostas para trabalhos futuros.

2. ANTENAS DE MICROFITA

Uma antena pode ser definida como um dispositivo transdutor para transmissão ou recepção de ondas eletromagnéticas. Deve ser capaz de transformar corrente elétrica de uma fonte externa em ondas eletromagnéticas (antena transmissora) e transformar ondas eletromagnéticas em sinais elétricos (antena receptora) [18]-[21]. As antenas classificam-se basicamente em antenas de fio, de abertura e de microfita. As antenas de microfita têm despertado o interesse de muitos pesquisadores, pois possuem características compatíveis com as atuais demandas dos sistemas sem fio. Dentre estas antenas, destacam-se: *patch*; monopolo impresso; Vivaldi.

A antena *patch* caracteriza-se por possuir largura de banda estreita, ganho em torno de 6 dB e tamanho reduzido [10]. Outras características desta antena serão abordadas em seções posteriores. Essa antena pode ser utilizada em aplicações comerciais e governamentais em diversas faixas de frequência. Geralmente é utilizada em aplicações sem fio nas faixas de frequência WLAN.

A antena monopolo impresso é uma outra antena de microfita muito utilizada em sistemas de comunicações sem fio. Sua estrutura é similar à antena *patch*, porém com um plano de terra truncado sob a linha de alimentação por microfita. Com isso, essas antenas apresentam características de banda larga e diagrama de irradiação aproximadamente omnidirecional. Sendo assim, são bastante utilizadas em aplicações em sistemas UWB [22].

Outra antena de microfita também caracterizada por ser de banda larga é a antena de Vivaldi. Esta antena não possui plano de terra e a estrutura em formato de V é impressa em apenas um dos lados do dielétrico. A alimentação da antena pode ser via cabo coaxial soldado no *slot* ou por acoplamento de uma linha de microfita impressa do outro lado do dielétrico. Devido sua característica de banda larga, a antena de Vivaldi é muito utilizada em aplicações UWB [23].

2.1. Antenas de Microfita do Tipo *Patch*

A estrutura da antena de microfita do tipo *patch*, ilustrada na Figura 1, consiste de um elemento irradiante metálico (*patch*) alimentado por uma linha de microfita e um plano de terra, que são separados por um substrato dielétrico de espessura h . A

linha de alimentação por microfita, o elemento *patch* e o plano de terra são depositados no substrato em camadas de pequena espessura ($t \ll \lambda_0$, em que, λ_0 denota o comprimento de onda no espaço livre na frequência de ressonância) [6]. Diferentes tipos de materiais com permissividade elétrica relativa de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ podem ser usados como substrato em projetos de antenas de microfita [6]. Quanto menor o valor de ϵ_r , maior a largura de banda e eficiência, entretanto, alguns materiais com essa característica são mais onerosos. O baixo custo do substrato de fibra de vidro, FR-4 com $\epsilon_r = 4,4$, é um motivo da sua ampla utilização em projetos de antenas de microfita.

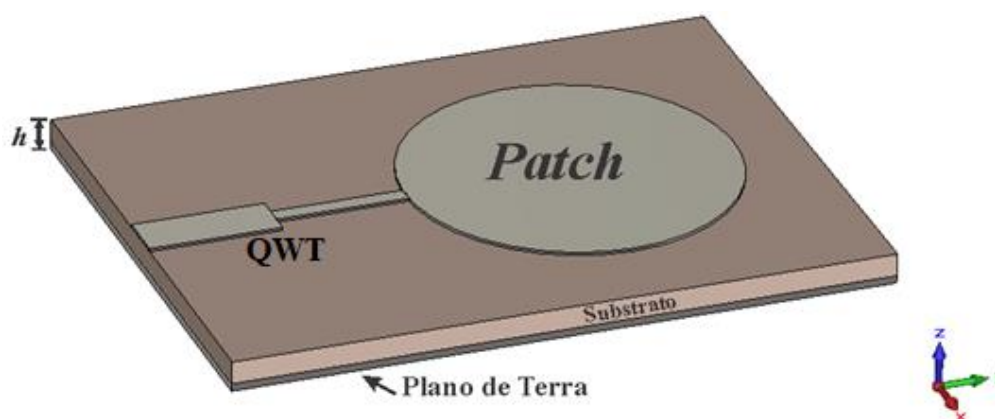


Figura 1 – Antena de microfita do tipo *patch*.

Os tipos de elementos irradiantes mais usuais em antenas de microfita do tipo *patch* são os retangulares e os elípticos, com os formatos quadrado e circular inclusos. Alguns tipos de elementos *patch* irradiantes utilizados em antenas de microfita são ilustrados na Figura 2. O tamanho e o tipo do formato do *patch* definem parâmetros fundamentais dessas antenas, tais como os parâmetros ressonantes: frequência de ressonância e largura de banda.

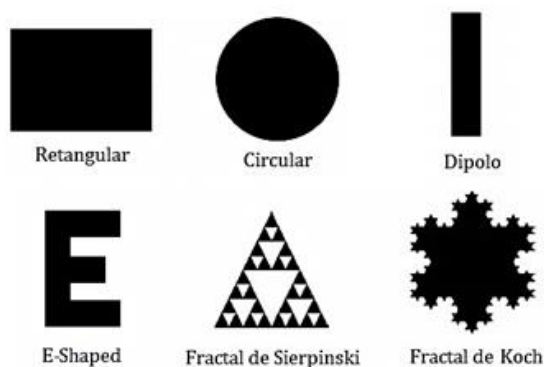


Figura 2 – Tipos de elementos *patch* irradiantes. Adaptado de [24].

2.1.1. Tipos de Alimentação

Há várias técnicas de alimentação de uma antena *patch* de microfita. As mais usuais são por linha de microfita, cabo coaxial, acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade [6], [25], [26]. Este texto abordará a técnica de alimentação por linha de microfita.

2.1.2. Técnica de Alimentação por Linha de Microfita

A linha de microfita é bastante utilizada para alimentação de antenas *patch*, pois é de fácil fabricação e pode ser posicionada facilmente no perímetro do *patch*, facilitando o casamento de impedâncias. Geralmente, estas antenas são alimentadas por uma linha com impedância de 50 Ω , Figura 3(a). Entretanto, a impedância na extremidade do elemento *patch* varia entre 150~300 Ω [6], com isso, a alimentação na configuração da Figura 3(a), geralmente, resulta em um descasamento de impedâncias. Algumas técnicas podem ser empregadas para se obter o casamento de impedâncias com linha de microfita. Destacam-se na Figura 3(b), 3(c), e 3(d) respectivamente, as técnicas de casamento *inset-fed*, transformador de quarto de onda ($\lambda_g/4$) e a híbrida, que é a junção das duas primeiras.

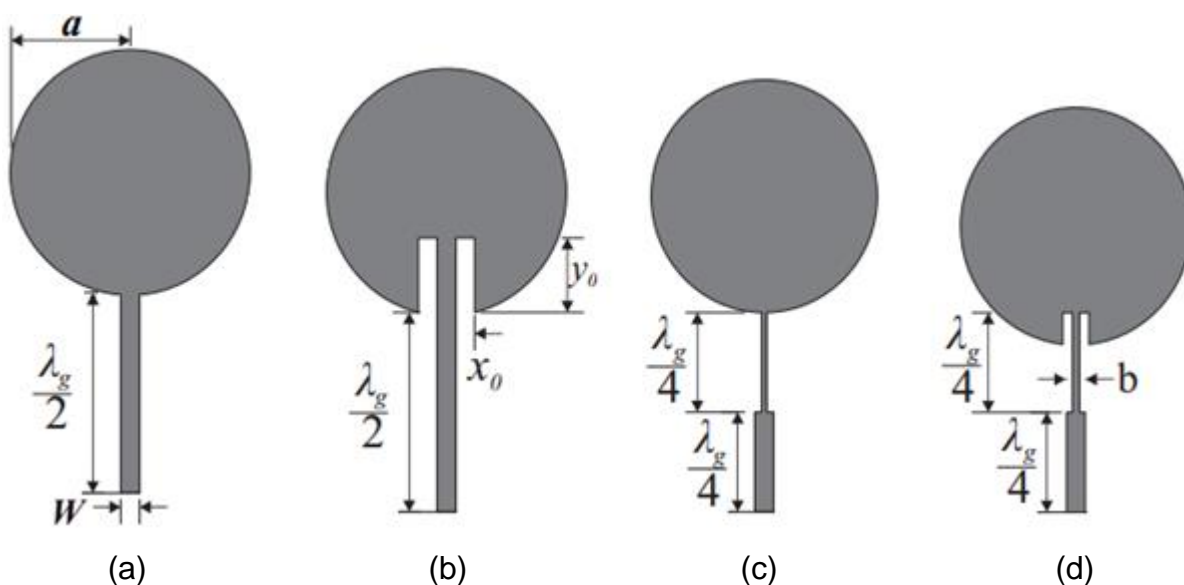


Figura 3 – Técnicas de alimentação por linha de microfita para antena *patch* circular: a) linha de microfita simples; b) *inset-fed*; c) transformador de quarto de onda; d) híbrida. Adaptado de [7].

Sabe-se que na borda do elemento *patch*, a impedância varia de 150-300 Ω e aproxima-se de zero em seu centro, e que a linha de microfita com impedância de 50

Ω quando acoplada à borda do *patch*, ocasiona um descasamento de impedâncias [6]. Portanto, a técnica de casamento de impedâncias *inset-fed* é uma alimentação endentada, na qual, a linha penetra no *patch* a uma distância y_0 até que a impedância do *patch* se iguale à impedância da linha e ocorra o casamento de impedâncias. A largura aproximada da linha de microfita pode ser obtida a partir das equações de projeto a seguir, onde são feitos os cálculos da impedância característica da linha de microfita (Z_0), equação (1), e da permissividade elétrica relativa efetiva (ϵ_{reff}), equação (2), para a relação $w/h < 1$ e $w/h \geq 1$, em que, w é a largura da linha e h é a espessura do substrato [7].

$$Z_0 = \frac{60}{(\epsilon_{reff})^{1/2}} \ln \left(\frac{8h}{w} + 0,25 \frac{w}{h} \right) \quad (1)$$

com ϵ_{reff} dado por:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} + 0,041 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Para a relação $w/h \geq 1$, tem-se:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{(\epsilon_{reff})^{1/2}} \frac{1}{\left[\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{w}{h} + 1,4444 \right) \right]} \quad (3)$$

com ϵ_{reff} dado por:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} \quad (4)$$

Definindo o projeto, para $A < 1,52$, tem-se:

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (5)$$

com A calculado por:

$$A = \frac{Z_0}{60} + \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (6)$$

e B calculado por:

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0(\epsilon_r)^{1/2}} \quad (7)$$

Na configuração da Figura 3(b), a largura da linha de microfita é a mesma da largura do *slot* no *patch* ($w = x_0$). Uma aproximação do comprimento do *slot* (y_0) em função do comprimento do *patch* (L) e da resistência de entrada (R_{in}) é calculada por (8) [6], [7]. Uma alteração da equação (8) para o *patch* circular é proposta em [27], onde o comprimento (L) é substituído pelo diâmetro do *patch* circular, equação (9).

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{50}{R_{in}}} \right) \quad (8)$$

$$y_0 = \frac{2a}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{50}{R_{in}}} \right) \quad (9)$$

Em que, R_{in} pode ser calculada pelas equações apresentadas em [6].

Utilizando-se a técnica de casamento com transformador de quarto de onda ($\lambda/4$), Figura 3(c), considera-se uma seção de linha de comprimento igual a um quarto do comprimento de onda guiado (λ_g) na frequência de ressonância, equação (11). Em que a largura da linha é calculada em função do valor de sua impedância característica (Z_0) dada por (12), em que, $Z_{in}=50 \Omega$ e $Z_L=Z_{ant}$ [7].

Muitas vezes, o casamento de impedâncias requer uma largura da linha do transformador de quarto de onda de valor relativamente pequeno, $b < 0,5$ mm, o que

pode inviabilizar a fabricação das antenas. Todavia, essa técnica se torna mais vantajosa do que a *inset-fed*, pois nela não é necessário alterar o perímetro do *patch* para se obter o casamento de impedâncias.

$$\lambda_g = \frac{3 \times 10^8}{f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (11)$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_{in} Z_L} \quad (12)$$

A técnica híbrida, Figura 3(d), é a junção das duas anteriores. Com ela é possível obter o casamento de impedâncias com uma largura de linha maior do que com o uso de transformador de quarto de onda e uma miniaturização da estrutura, tendo em vista que o comprimento dos *slots* é reduzido.

2.2. Antena de Microfita do Tipo *Patch* Circular

O *patch* circular, Figura 4, tem sido muito utilizado, não somente como único elemento, mas também na composição de arranjos de antenas. Neste formato de elemento *patch*, assim como no retangular, são suportados os modos TM^z , em que a direção z é perpendicular ao *patch*, e podem ser determinados considerando o elemento irradiante, o plano de terra e o substrato como uma cavidade circular [6].

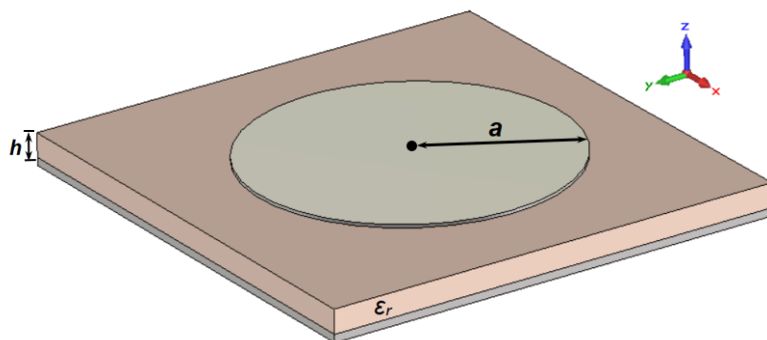


Figura 4 – Antena com elemento *patch* circular.

Este formato de *patch* possui apenas um grau de liberdade, que é o raio (a), o que representa uma desvantagem em relação ao retangular, que possui dois (largura e comprimento). Entretanto, o *patch* circular é mais compacto que o retangular ou o quadrado. Seus modos não podem ter a ordem alterada com a alteração do raio,

todavia a frequência de ressonância em seu valor absoluto é alterada em cada modo [6].

Para o modelo utilizado em [6], os parâmetros solicitados para o projeto do raio são: a permissividade elétrica relativa do material (ϵ_r), a espessura do substrato (h) em cm e a frequência de ressonância desejada (f_r) em Hz. Com essas variáveis de entrada é possível determinar o raio (a) do *patch* pela equação (13).

$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (13)$$

com F dado por:

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (14)$$

2.2.1. Frequência de Ressonância

A frequência específica que apresenta o menor coeficiente de reflexão, ou seja, apresenta o melhor casamento de impedâncias, é chamada de frequência de ressonância (f_r) [28], [29].

Uma aproximação para a frequência de ressonância de uma antena *patch* circular é dada em (15). Com valores de espessura do substrato (h) pequenos ($h < 0,05\lambda_0$), a frequência de ressonância para o modo dominante (TM_{110}) é dada por (16), em que, v_0 é a velocidade da luz no espaço livre [6], [30].

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \left(\frac{x'_{110}}{a} \right) \quad (15)$$

com, $x'_{110} = 1,8412$.

$$f_r = \frac{1,8412v_0}{2\pi a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (16)$$

2.2.2. Largura de Banda

A largura de banda de uma antena é definida em uma banda restrita de frequências onde ela funciona com um desempenho eficiente. Um dos critérios adotados para definir largura de banda é o módulo do coeficiente de reflexão $|S_{11}| \leq -10$ dB, garantindo assim, que, para uma antena transmissora, pelo menos 90% da potência entregue à antena será irradiada no espaço [6]. De forma genérica, a largura de banda (*Bandwidth* – BW), ou banda passante da perda de retorno (*Return Loss* – RL), equação (17), é a diferença entre a frequência superior, f_2 , e a frequência inferior, f_1 , em -10 dB, Figura 5. Em valor absoluto a largura de banda é expressa por (18), em termos percentuais, por (19) [28], [29].

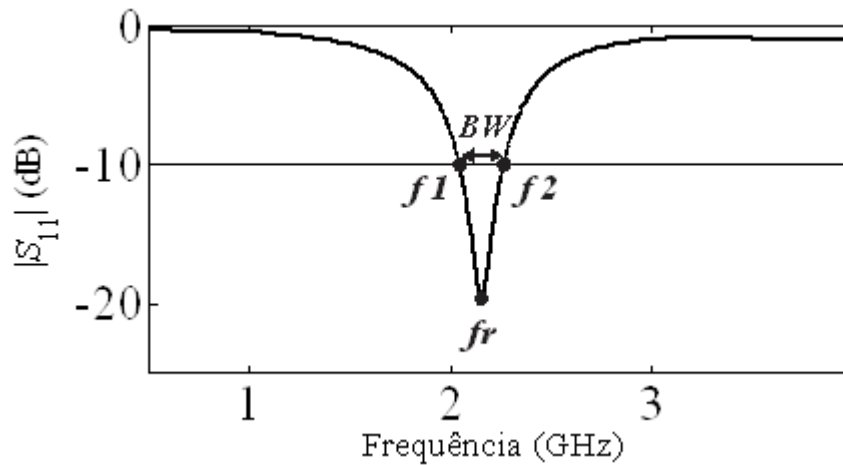


Figura 5 – Largura de banda considerando o módulo do coeficiente de reflexão.

$$RL(dB) = -20 \log(|S_{11}|) \quad (17)$$

$$BW = f_2 - f_1 \quad (18)$$

$$BW(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_r} 100 \quad (19)$$

2.3. Antenas Bioinspiradas

A natureza tem evoluído durante milhares de anos. Durante esse processo evolutivo, os seres vivos estão em constante desenvolvimento e adaptação na busca da melhor forma para sobreviverem. Os projetos de engenharia bioinspirada imitam a forma ou o comportamento desses seres na busca por soluções ótimas. Atualmente, pesquisadores têm desenvolvido projetos de dispositivos com formatos bioinspirados, geralmente em plantas e animais, visando aplicações em sistemas de comunicação sem fio.

As plantas são estruturas otimizadas pela natureza com o objetivo principal de captação de irradiação de solar. A maioria delas são organismos fotossintéticos que utilizam sistemas de antenas nos centros de captação da luz, transferindo a energia captada para os centros de reação, local onde acontece o processo fotoquímico. Esse processo é similar ao que ocorre em antenas com refletores parabólicos, onde as ondas eletromagnéticas são direcionadas para o centro do refletor [31]. Neste sentido, as antenas com elementos *patch* bioinspirados em plantas ou em parte delas (folhas e flores), têm o objetivo de transmitir/captar ondas eletromagnéticas de forma análoga à captura de irradiação solar realizada pelas plantas [7], [10], [22].

Uma planta que particularmente possui potencial para acumular a luz solar, é a flor de lótus. Antes de amanhecer, a flor de lótus emerge na superfície da água e desabrocha. Durante à noite, as pétalas da flor se fecham e submergem na água [32].

Assim como as plantas, os animais também são fontes de inspiração para elementos irradiantes de antenas. Geralmente são utilizadas partes externas dos animais [33], entretanto, partes internas também podem ser imitadas [34]. Um exemplo de uma bioinspiração em partes externas de animais é encontrada em [35], no qual uma antena monopolo foi bioinspirada no formato de uma borboleta e projetada para a faixa de 3,0 a 10,8 GHz.

2.3.1. Estado da Arte

Nesta seção abordam-se algumas antenas bioinspiradas em plantas e animais. Estas antenas podem ser encontradas na literatura especializada operando em diversas faixas de frequência.

Em [36], tem-se uma antena inspirada no formato da antena de uma barata. A alimentação é realizada via cabo coaxial. A antena apresenta característica UWB,

alcançando uma largura de banda de 120% para um substrato com permissividade de 4,5. Quando simulada para o ar, alcançou apenas 42% de largura de banda. Após algumas alterações, a antena apresentou uma largura de banda de quase 114% com o ar como substrato.

Uma antena do tipo CPW (*coplanar waveguide* – guia de ondas coplanar) bioinspirada nas antenas curvadas de vespas para aplicações em 2,4 GHz é apresentada em [37]. A antena é alimentada por linha de microfita com a largura entre as linhas coplanares calculadas de acordo com o desenho de Chebyshev. A antena apresentou uma largura de banda 9%, suficiente para cobrir toda a faixa para aplicações *WLAN* em 2,4 GHz.

O projeto de uma antena monopolo bioinspirada na cabeça de um morcego para aplicações UWB de 2,75 – 14 GHz e bandas de rejeição nas aplicações *WiMAX* (*Worldwide Interoperability for Microwave Access* - Interoperabilidade Mundial para Acesso de Micro-Ondas), *WLAN* e *DSRC* entre 3,2 – 4 GHz e 5 – 6 GHz é descrito em [38]. A antena é alimentada por linha de microfita e são adicionadas duas ranhuras em formato de C na estrutura, permitindo a rejeição das duas faixas mencionadas.

O formato de uma borboleta utilizado como inspiração para uma antena *patch* para aplicações *WLAN* em 2,4 GHz é apresentado em [7]. O elemento *patch* da antena foi gerado a partir de uma equação polar. O resultado da medição apresentou uma largura de banda de 47 MHz, sendo insuficiente para cobrir a banda desejada.

Em [39], uma flor de tulipa é inspiração para uma antena monopolo para aplicações UWB. Com o objetivo de aumentar a largura de banda da antena, uma ranhura em formato de Pi é inserida no centro do elemento irradiante da antena.

Uma antena bioinspirada na planta cana-de-açúcar para aplicações em sistemas de comunicação de quarta geração (4G) é apresentada em [40]. Os autores comparam o resultado equivalente obtido com uma antena *patch* retangular com o obtido da antena bioinspirada. Com isso, demonstram que o tamanho de elemento irradiante pode ser significativamente reduzido quando se utiliza a antena bioinspirada.

Em [41], uma antena vestível bioinspirada na folha da planta *Gynkgo Biloba* para aplicações nas tecnologias 2G, 3G e 4G (LTE), é apresentada. A antena é fabricada utilizando o *jeans* como substrato. As medições foram realizadas com a antena ao ar livre, próxima à cabeça, a mão e no bolso. A antena apresentou largura

de banda de 2,7 GHz na faixa de 1,8 – 3,2 GHz com diferenças significativas nos diferentes tipos de medições.

O projeto de uma antena bioinspirada na folha da *Wayfaring-tree* (*Viburnum lantana*) para aplicações WLAN em 2,4 GHz é descrito em [42]. A antena é alimentada por linha de microfita e apresenta largura de banda de 61 MHz, insuficiente para cobrir totalmente a faixa desejada.

2.4. Antenas Vestíveis

As antenas vestíveis são antenas de microfita desenvolvidas com o uso de substratos dielétricos flexíveis. Pesquisas relacionadas a este tipo de antena tornaram-se frequentes nos últimos anos [43]-[45]. Essas antenas são utilizadas próximas ao corpo humano, por exemplo, em aplicações médicas para o monitoramento de pacientes [46]-[48] ou integradas no uniforme de bombeiros para o monitoramento sem fio dos sinais vitais destes profissionais em brigadas de incêndios [49]. As antenas flexíveis podem ser desenvolvidas em uma variedade de substratos dielétricos, entre os quais destaca-se o *jeans* [22]. O *jeans* é um tecido composto pelo denim (trama de algodão fiado e tecido) tingido com o índigo, um pigmento de cor azul.

Deve-se considerar o tipo de tecido utilizado como substrato para o projeto de antenas vestíveis impressas em substratos dielétricos têxteis. A espessura reduzida desses materiais (aproximadamente 1 mm) e sua maleabilidade são características que podem dificultar o processo de fabricação de uma antena vestível. Além disso, a técnica de fixação dos elementos condutores da antena no substrato têxtil flexível é importante para obtenção de resultados experimentais desejados [50].

Uma das técnicas para fabricação/confecção de antenas têxteis é a colagem. Nesta técnica os elementos condutores (linha de alimentação, elemento irradiante e plano de terra) são recortes de um material condutor laminado flexível aderente ou não. Fitas condutoras adesivas são mais adequadas, tendo em vista a distribuição uniforme do adesivo. Por outro lado, o processo manual de colagem resulta em superfícies desiguais, que podem alterar as propriedades da antena [22], [50]-[54].

2.4.1. Estado da Arte

Nesta seção é apresentada uma breve revisão da literatura sobre antenas vestíveis fabricadas com substratos dielétricos têxteis. Uma antena vestível tipo *patch* com polarização circular para aplicações em comunicações via satélite e navegação é apresentada em [55]. A antena *patch* foi fabricada com duas camadas de *Nylon* como substrato. Neste caso, um *patch* retangular com uma fenda em forma de Z é fixado na camada superior; na camada inferior encontra-se o plano de terra. A alimentação da antena é feita via cabo coaxial e os elementos condutores foram costurados no tecido. A antena apresentou uma largura de banda suficiente para as aplicações desejadas, mantendo suas propriedades de irradiação quando dobrada ou aproximada do corpo humano.

Em [56], uma antena vestível com o elemento *patch* em formato de L é apresentada para aplicações WLAN em 2,4 GHz. A alimentação da antena é realizada por meio de um guia de ondas coplanar. A antena é fabricada com fita de cobre adesiva fixada sobre o *jeans*. Os resultados simulados e experimentais apresentam largura de banda suficiente para cobrir a faixa de 2400 - 2483 MHz.

A caracterização de uma antena monopolo com elemento *patch* retangular com uma fenda triangular para aplicações WLAN em 2,4 GHz é discutida em [57]. O protótipo da antena foi fabricado com uma fita de cobre adesiva cortada manualmente e colocada sobre um substrato *jeans*. A alimentação é realizada por linha de microfita e a fenda triangular na antena promove o aumento da frequência de ressonância. A antena apresentou resultados simulados satisfatórios, cobrindo toda a faixa desejada. Entretanto, nos resultados experimentais, houve um deslocamento da frequência de ressonância, saindo da faixa desejada. A discordância entre os resultados é atribuída ao processo de fabricação.

O projeto de uma antena *patch* retangular fabricada em substrato *jeans* para aplicações em GPS é descrito em [58]. A antena é alimentada por linha de microfita utilizando a técnica de casamento de impedâncias, *inset-fed*. Uma análise para diferentes ângulos de dobras da antena é realizada, assim como para aplicações próximas ao corpo humano. As análises mostram que os parâmetros das antenas, como eficiência e ganho, foram alterados com as dobras e a aproximação ao corpo humano.

Uma técnica alternativa para a fabricação de antenas vestíveis com substratos têxteis com aplicações para a banda L1 de GPS é a apresentada em [59]. A antena é fabricada em substrato de algodão com o plano de terra e o *patch* retangular bordados com um auxílio de uma máquina de bordar. A alimentação é por linha de microfita utilizando a técnica *Inset-fed* para o casamento de impedâncias. Os efeitos de curvatura da antena com o raio similar ao do braço humano são simulados no espaço livre.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo descreve-se o procedimento metodológico utilizado para o desenvolvimento das antenas *patch* abordadas nesta dissertação.

3.1. TRANSFORMAÇÕES POLARES

Nesta seção abordam-se alguns conceitos referentes às equações polares utilizadas para geração dos elementos irradiantes das antenas deste trabalho.

3.1.1. Funções Polares

O sistema de coordenadas polares, introduzido pelo cientista Isaac Newton, é representado no plano por um ponto O , denominado de polo (ou origem), uma semirreta iniciando em O e se deslocando para direita na direção horizontal, chamado de eixo polar, e um outro ponto qualquer a uma distância do ponto O e inclinado em relação ao eixo polar. Este sistema é ilustrado na Figura 6, onde o ponto inicial é o ponto O e o eixo polar é uma semirreta \overline{OB} com um outro ponto P inclinado a um ângulo θ em relação ao eixo polar a uma distância r do polo [60].

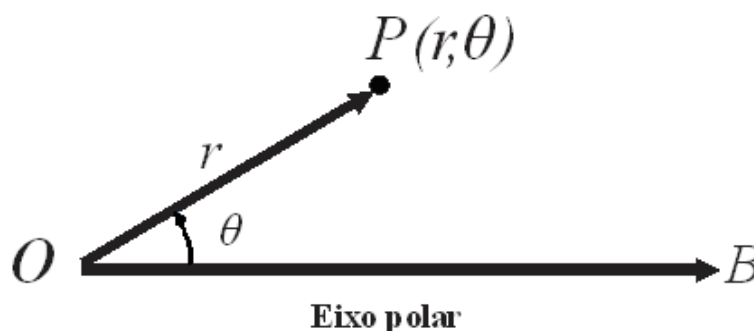


Figura 6 – Sistema de coordenadas polares.

Funções como a seno e cosseno, entre outras, podem ser utilizadas no sistema de coordenadas polares para gerar formas semelhantes às das folhas, flores e até animais. O uso das funções seno e cosseno é representado nos gráficos da Figura 7. Estas geometrias foram obtidas a partir de implementações no *software* MATLAB® variando o ângulo θ de $0 - 2\pi$ com passos de $\pi/100$ [10].

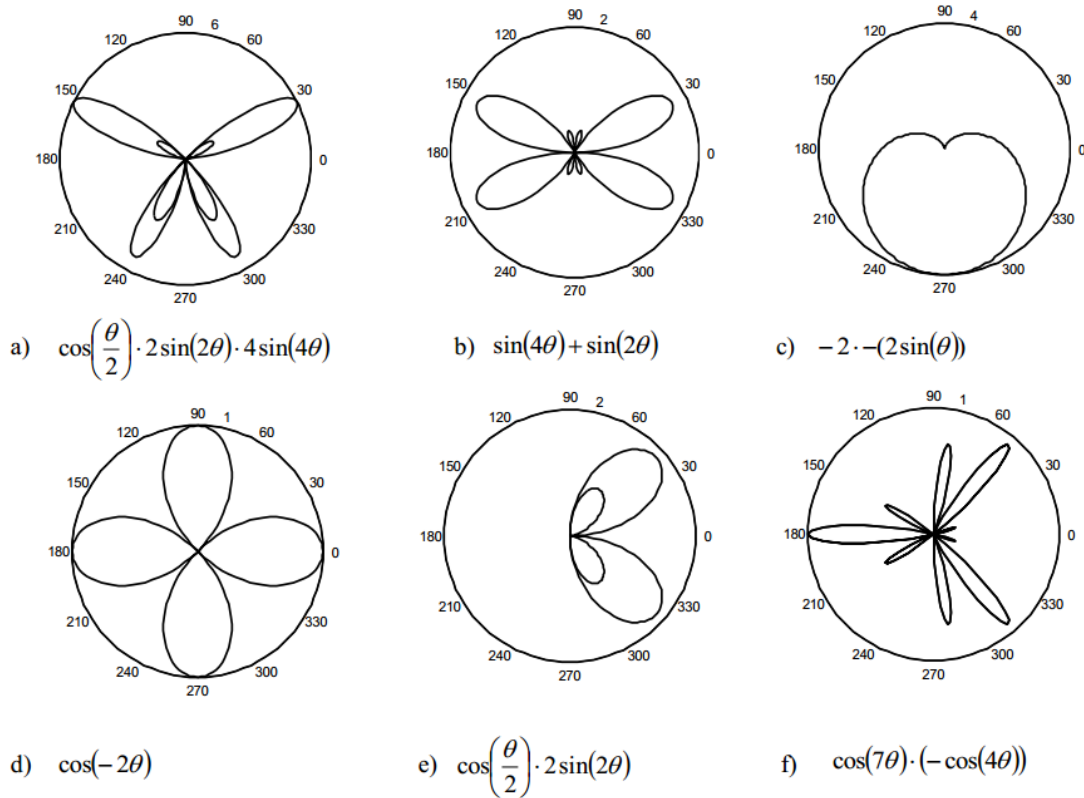


Figura 7 – Gráficos de equações polares envolvendo funções seno e cosseno: a) borboleta; b) borboleta com antenas; c) cardioide; d) rosácea de 4 pétalas; e) duas asas de borboleta; f) libélula [10].

3.1.2. Fórmula de Gielis

O botânico Johan Gielis [61], baseado em superelipses geradas a partir de (20), e percebendo suas desvantagens com relação à simetria limitada de algumas formas geométricas geradas por essa equação, introduziu coordenadas polares do tipo $r = f(\theta)$ substituindo x por $r\cos(\theta)$ e y por $r\sin(\theta)$ em (20) e multiplicando-se o argumento θ por um fator $m/4$. Com essas alterações obtém-se a superfórmula de Gielis, reescrita em (21), que possibilita a obtenção de diferentes formas geométricas através da alteração das variáveis d , k , m , n_1 , n_2 e n_3 . Em que tais variáveis pertencem aos números reais.

$$\left|\frac{x}{d}\right|^n + \left|\frac{y}{k}\right|^n = 1 \quad (20)$$

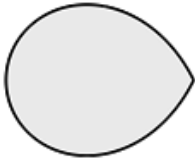

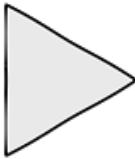

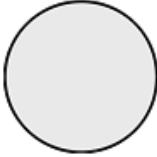



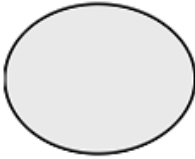






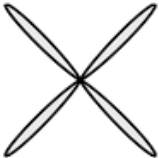
$$r(\theta) = \frac{1}{\left\{ \left[\left(\left| \frac{1}{d} \cos \left(\theta \frac{m}{4} \right) \right| \right)^{n_2} + \left(\left| \frac{1}{k} \cos \left(\theta \frac{m}{4} \right) \right| \right)^{n_3} \right]^{1/n_1} \right\}} \quad (21)$$

Uma variação da superfórmula é apresentada na equação (22). A proposta de combinação com outras funções proporciona um aumento do número de possíveis formas geométricas.

$$r = f(\theta) \frac{1}{\sqrt[n_1]{\left(\left| \frac{1}{d} \cos \left(\theta \frac{m}{4} \right) \right| \right)^{n_2} + \left(\left| \frac{1}{k} \cos \left(\theta \frac{m}{4} \right) \right| \right)^{n_3}}} \quad (22)$$

Na Tabela 1 são apresentadas algumas geometrias geradas pela modificação dos parâmetros em (21).

Tabela 1 – Exemplos de geometrias da superfórmula com $n_1 = -0,5$. Adaptado de [7].

$n_2 = n_3$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
1				
3				
5				
10				

O uso dos elementos polares com formatos do tipo rosácea, como observado na terceira linha da tabela 1, além do raio, possibilita mais um grau de liberdade no projeto: o número de pétalas.

Além de Gielis, outros pesquisadores têm desenvolvido trabalhos utilizando equações polares para imitar o formato de seres encontrados na natureza [62], [63].

3.2. Tipos de Elementos *Patch* Abordados

Os elementos *patch* das antenas abordadas neste trabalho são definidos por equações em coordenadas polares e desenvolvidos com auxílio de ferramentas de CAD (*Computer-Aided Design*) a partir da implementação de algoritmos em MATLAB®. Estes elementos são convertidos em arquivos com formato DXF (*Drawing Exchange Format*) através de uma biblioteca apropriada. Esta conversão possibilita a importação deste arquivo no ambiente do Ansoft Designer® [17], *software* de análise de onda completa utilizado para a análise eletromagnética das antenas desenvolvidas nesta dissertação.

3.2.1. Elemento *Patch* Circular

Os elementos *patch* das antenas abordadas possuem parâmetros pré-definidos, como o raio e o número de pétalas, e são projetados a partir de um *patch* circular convencional. O *patch* da antena circular é obtido a partir da equação (21), todavia, poderia ser obtido diretamente no Ansoft, pois o *software* já dispõe desta geometria como ferramenta de projeto. O único parâmetro a ser considerado para o projeto do *patch* circular, nesta dissertação, é o raio, que é modificado de acordo com os requisitos da análise paramétrica posteriormente abordada.

O *patch* circular foi obtido com a implementação em MATLAB® da equação (21). Os mesmos parâmetros da terceira linha da Tabela 1 foram mantidos para o projeto do *patch* da antena ilustrada na Figura 8, com $m = 0$, $n_2 = 5$, $n_3 = 5$, $n_1 = -0,5$, $d = 10$, $k = 10$ e θ variando de $0 - 2\pi$. Os parâmetros de projeto da estrutura, assim como as dimensões do plano de terra finito (L_{pt} e W_{pt}), encontram-se na Tabela 2.

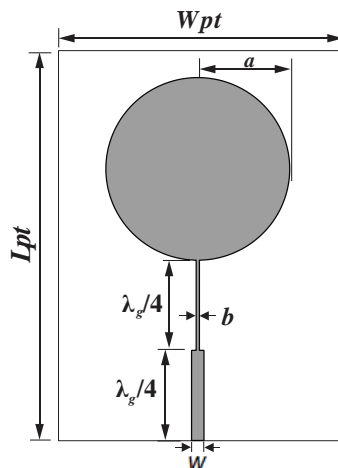


Figura 8 – Antena *patch* circular.

3.2.2. Elemento *Patch* Polar de Gielis #1

O primeiro tipo de elemento *patch* proposto para a realização da análise paramétrica da frequência de ressonância e da largura de banda com a variação do raio e do número de pétalas no elemento irradiante, é ilustrada na Figura 9 para 4 variações do parâmetro m da equação (21). Os mesmos parâmetros para a geração do *patch* circular foram mantidos, com exceção do parâmetro m , que representa o número de pétalas que se deseja inserir no *patch*.

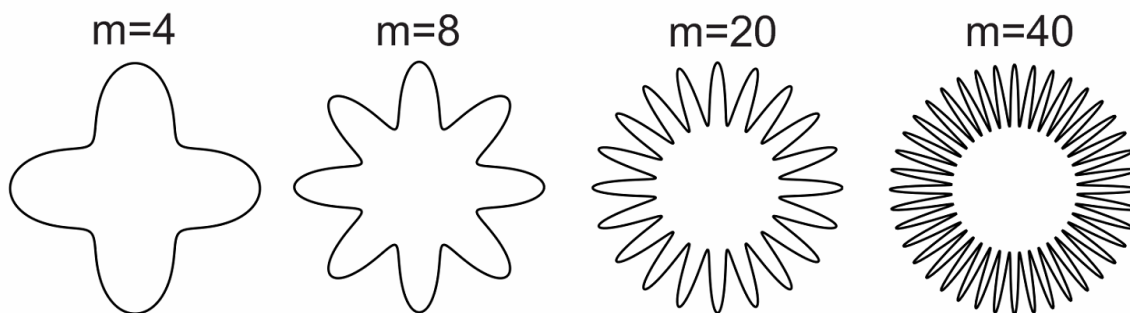


Figura 9 – Quatro variações do parâmetro m para o *patch* da antena de Gielis #1.

Na Figura 10 é ilustrado o projeto da antena de Gielis #1 para o elemento *patch* com quatro pétalas. O raio de 20 mm é o selecionado para a realização de uma das análises paramétricas deste trabalho. Os parâmetros do projeto encontram-se na Tabela 2.

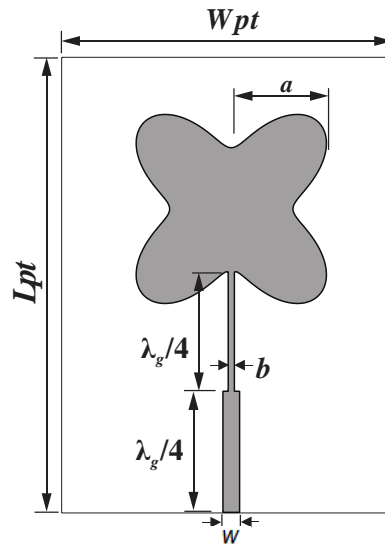


Figura 10 – Antena de Gielis #1 com quatro pétalas.

3.2.3. Elemento *Patch* Polar de Gielis #2

O segundo tipo de *patch* proposto para a realização da análise paramétrica da frequência de ressonância e da largura de banda com a variação do raio e do número de pétalas no elemento irradiante, é ilustrada na Figura 11 para 4 variações do parâmetro m da equação (21). Para este tipo de elemento irradiante, os seguintes parâmetros foram alterados: $n_2 = 1,5$; $n_3 = 3,2$; $n_1 = 1,5$; $d = 1,6$; $k = 1,7$.

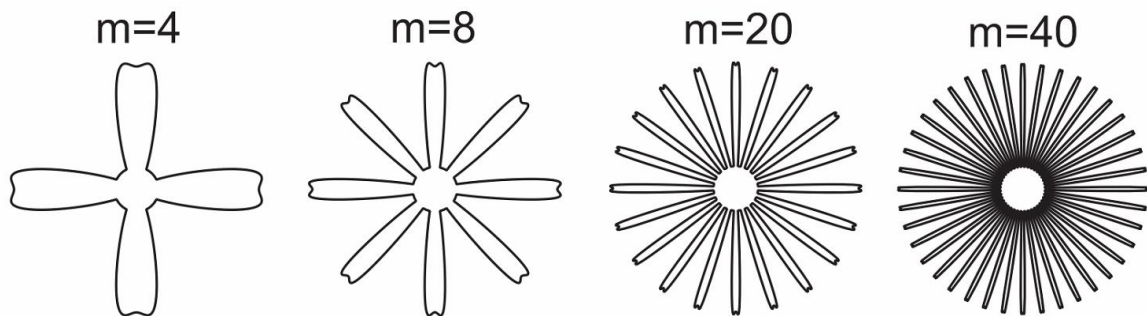


Figura 11 – Quatro variações do parâmetro m para o *patch* da antena de Gielis #2.

O projeto da antena de Gielis #2, para o elemento *patch* com quatro pétalas, é ilustrado na Figura 12. As dimensões de projeto da antena podem ser visualizadas na Tabela 2.

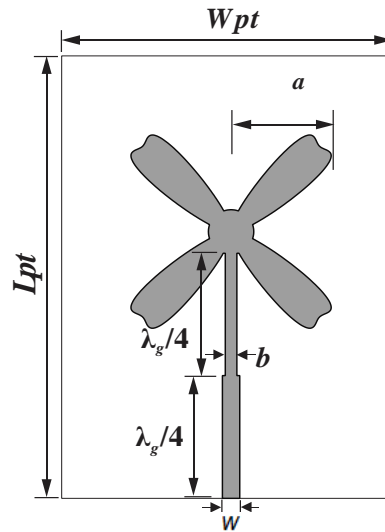


Figura 12 – Antena de Gielis #2 com quatro pétalas.

3.2.4. Elemento *Patch* Polar de Gielis #3.

Do mesmo modo, o terceiro tipo de elemento irradiante proposto para a realização da análise paramétrica foi gerado a partir da equação (21). Para este elemento irradiante, os seguintes parâmetros foram considerados: $n_2 = 5$; $n_3 = 5$; $n_1 = -0,6$; $d = 1$; $k = 1$. Na Figura 13 é possível observar quatro variações da variável m para a terceira geometria utilizada.

O projeto da antena de Gielis #3, para o elemento *patch* com quatro pétalas, é representado na Figura 14. As dimensões de projeto para esta antena encontram-se na Tabela 2.

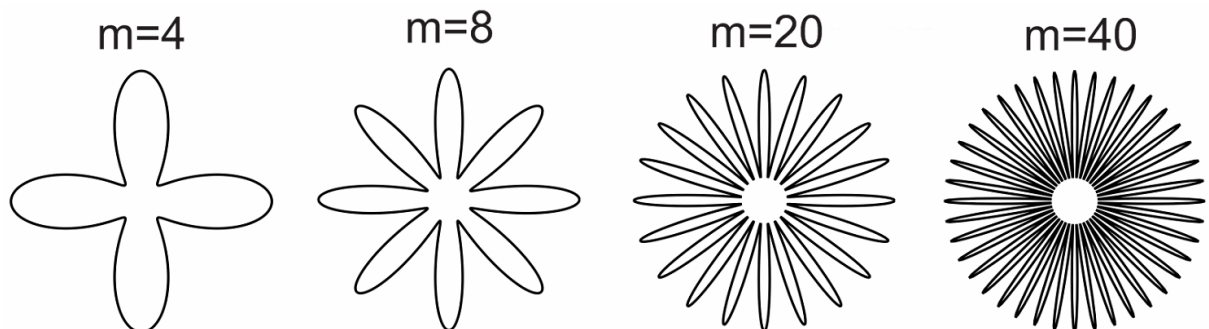


Figura 13 – Quatro variações do parâmetro m para o *patch* da antena de Gielis #3.

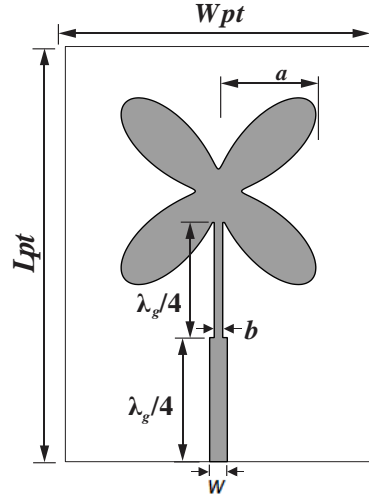


Figura 14 – Antena de Gielis #3 com quatro pétalas.

3.2.5. Elemento *Patch* Bioinspirado na Flor de Lótus

O quarto e último tipo de *patch* proposto para a realização da análise paramétrica foi bioinspirado na flor de Lótus (*Nelumbo nucifera*). Este tipo de *patch* é gerado pela equação polar (23), e foi abordado inicialmente por Oliveira [7], onde a variável m representa a metade da quantidade de pétalas que se deseja inserir no elemento irradiante.

$$r(\theta) = \frac{2,5 + \cos(\theta m) + (0,25 - \cos(\theta m + \frac{\pi}{2})) 2}{2 + \cos(\theta 2m + \frac{\pi}{2}) 8} \quad (23)$$

Na Figura 15 são apresentados os elementos irradiantes gerados pelo algoritmo contendo a equação (23) e implementado em MATLAB® com raio = 20 mm, θ variando de 0 - 2π e com quatro variações da variável m .

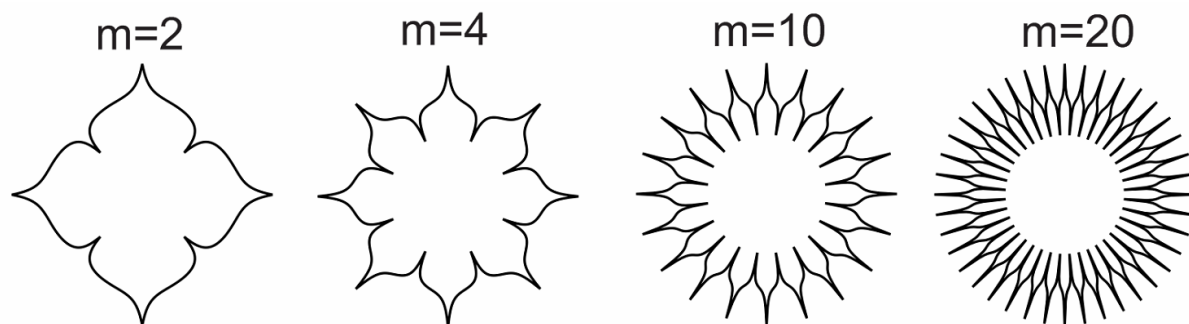


Figura 15 – Quatro variações do parâmetro m para o *patch* bioinspirado na flor de Lótus.

Basicamente são esses os passos quando se deseja trabalhar com elementos irradiantes bioinspirados: buscar inspiração na natureza, Figura 16(a); tentar imitar essa geometria, Figura 16(b); projetar a antena com formato de *patch* desejado, Figura 16(c). No projeto dessa estrutura foi considerado $m = 6$, gerando 12 pétalas. Na Figura 16(d) é ilustrada a antena projetada para $m=4$.

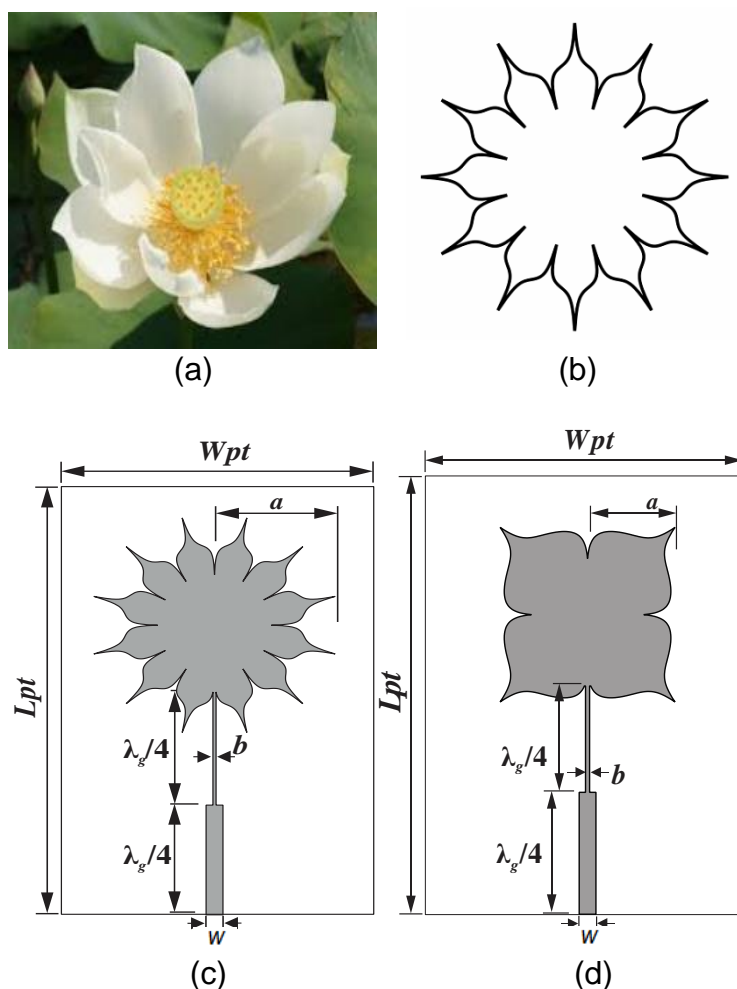


Figura 16 – Antena com *patch* bioinspirado na flor de Lótus: a) flor de Lótus; b) *patch* bioinspirado; c) antena flor de Lótus com doze pétalas; d) antena flor de Lótus com quatro pétalas.

As dimensões de projeto da antena bionspirada na flor de lótus com quatro pétalas, Figura 16(d), são listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões de projeto das antenas propostas (mm).

Antena	W_{pt}	L_{pt}	w	$\lambda_g/4$	a	b
Circular	56	87	2,7	19,7	20	0,7
Gielis #1	50	75	2,7	19	20	1
Gielis #2	50	70	2,7	19,5	20	1,8
Gielis #3	50	70	2,7	19,5	20	1,3
Lótus	50	73	2,7	19,7	20	0,65

3.3. Antena Vestível

Nesta seção é apresentado o projeto de uma antena *patch* bioinspirada utilizando substrato dielétrico têxtil para aplicações vestíveis nas faixas WiMAX em 3,5 GHz e WLAN em 5 GHz.

O *patch* da antena é bioinspirado na flor de Anêmona (*Anemone Coronaria*) da família das ranunculáceas. O elemento irradiante foi gerado a partir da equação (21) com os seguintes parâmetros utilizados: $n_2 = 30$; $n_3 = 30$; $n_1 = -60$; $d = 1$; $k = 1$. Na Figura 17(a) é ilustrada a flor Anêmona e na Figura 17(b) é ilustrada a antena bioinspirada. As dimensões de projeto da antena projetada para 3,5 GHz encontram-se na Tabela 3.

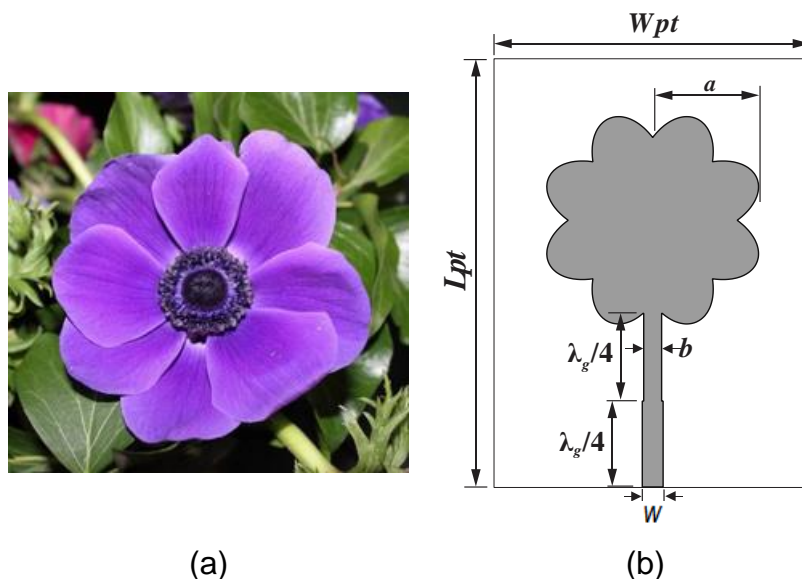


Figura 17 – Antena vestível bioinspirada na flor Anêmona: a) flor Anêmona; b) antena bioinspirada na flor Anêmona.

Tabela 3 – Dimensões de projeto da antena bioinspirada na flor Anêmona (mm).

Antena	W_{pt}	L_{pt}	w	$\lambda_g/4$	a	b
Vestível	50	72	3,6	15,2	19,45	3,1

A antena têxtil foi projetada considerando um substrato *jeans* de 0,75 mm de espessura e um material condutor laminado adesivo de cobre de 0,035 mm, geralmente utilizado para blindagem eletromagnética de instrumentos musicais e pode ser visualizado na Figura 18.



Figura 18 – Laminado adesivo de cobre.

Com o uso desse material dielétrico no desenvolvimento da antena, foi necessário realizar a caracterização experimental de suas propriedades, como a permissividade elétrica relativa e a tangente de perdas. O substrato dielétrico foi caracterizado no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus João Pessoa, no VNA da *Agilent Technologies* modelo S5071C (300 kHz – 20 GHz), como pode ser observado no arranjo de medição da Figura 19.

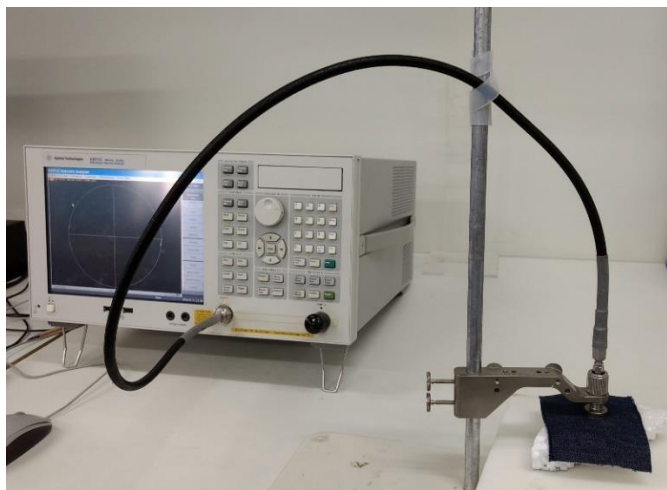


Figura 19 – Arranjo de medição usado para caracterização experimental do *jeans*.

O resultado da caracterização experimental do substrato para a permissividade pode ser visualizado na Figuras 20 e para a tangente de perdas, na Figura 21.

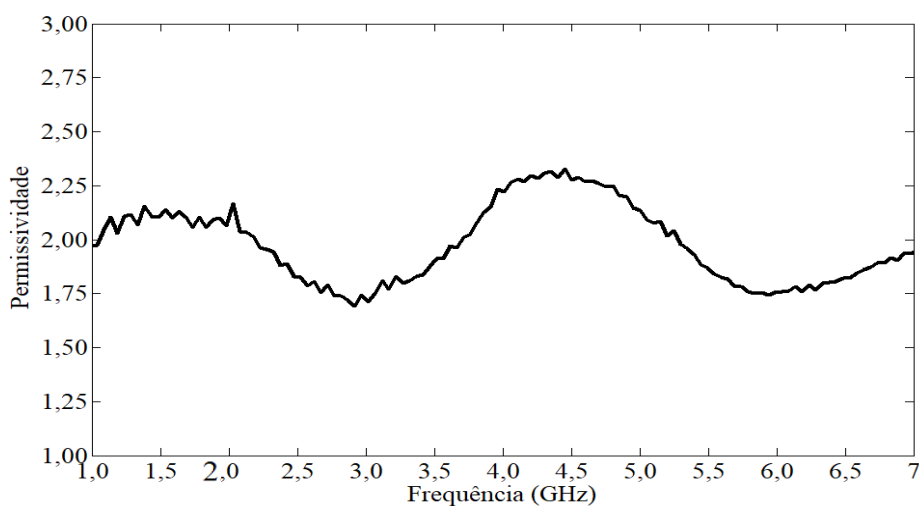


Figura 20 – Permissividade elétrica relativa do *jeans*.

Para a frequência de projeto (3,5 GHz), a permissividade elétrica relativa, $\epsilon_r = 1,75$, Figura 20, e a tangente de perdas, $\tan(\delta) = 0,08$, Figura 21.

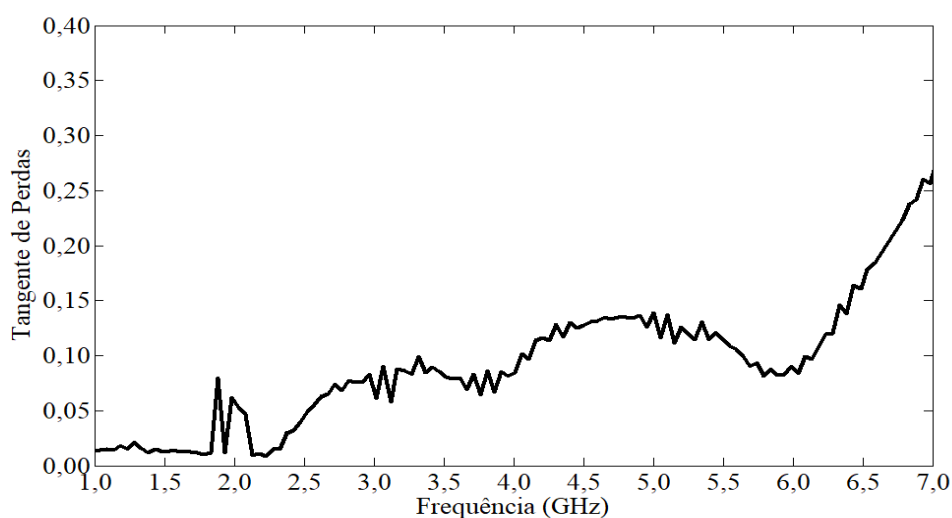


Figura 21 – Tangente de perdas do jeans.

O processo de fabricação, do elemento *patch* com a linha de microfita, foi pelo método de corrosão com percloroeto de ferro. Como pode ser observado na Figura 22(a) e 22(b), para a alimentação da antena, foi soldado um conector SMA fêmea na linha de microfita e no plano de terra.

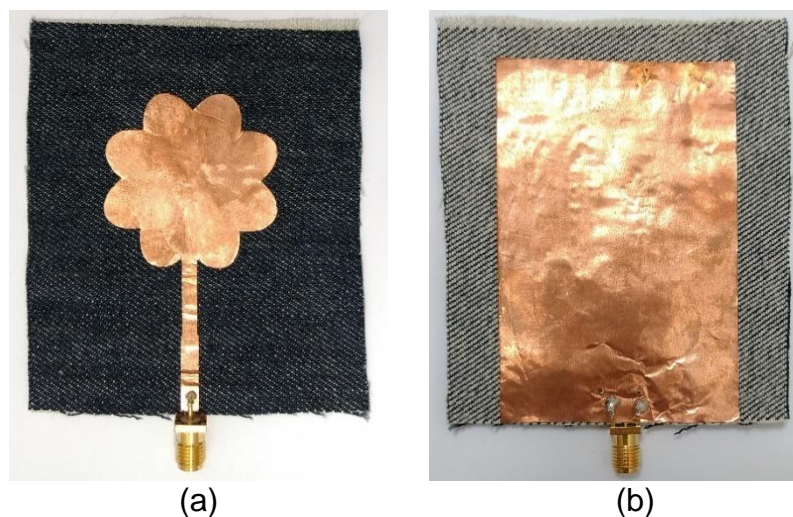


Figura 22 – Protótipo da antena vestível: a) elemento *patch*; b) plano de terra.

Os resultados da caracterização experimental da antena foram obtidos no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do IFPB utilizando um analisador de redes vetorial (*Agilent Technologies*, modelo N5230A), que pode ser visualizado no arranjo de medição da Figura 23.

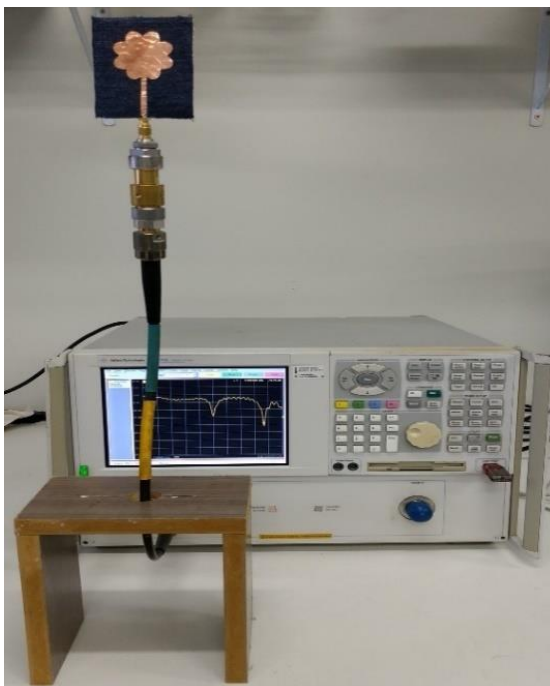


Figura 23 – Arranjo de medição usado para caracterização experimental da antena vestível.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos parâmetros de irradiação, largura de banda e frequência de ressonância das antenas abordadas. Além disso, são abordadas duas análises paramétricas, da largura de banda e frequência de ressonância em função do raio e do número de pétalas e para o número de frequências ressonantes em função de um raio específico e do número de pétalas, para os quatro tipos de elementos irradiantes considerados.

4.1. Antena Circular

O protótipo da antena *patch* circular foi fabricado pelo método de corrosão com percloreto de ferro utilizando como substrato um material dielétrico FR-4 livre de halogênio (MCL-BE-67G tipo (H), Hitachi Chemical), com espessura $h = 1,5$ mm, permissividade elétrica relativa, $\epsilon_r = 4,78$ e tangente de perdas, $\delta = 0,019$. Estas propriedades foram extraídas da caracterização experimental deste material realizada em [7].

Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do IFPB utilizando um analisador de redes vetorial (*Agilent Technologies*, modelo N5230A), que pode ser visualizado no arranjo de medição de uma das antenas na Figura 24.

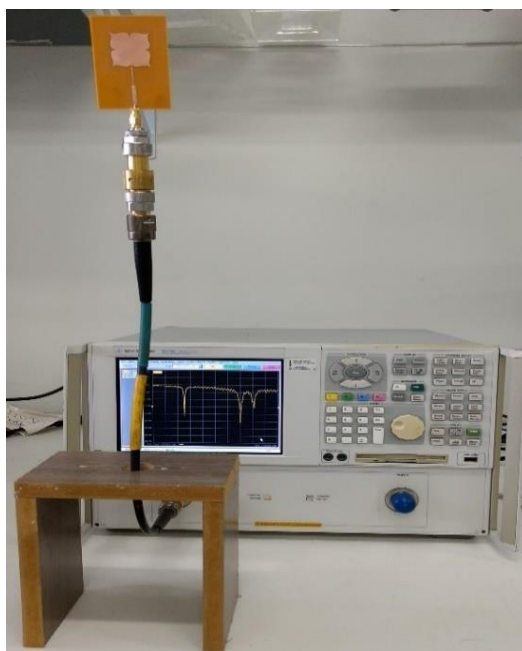


Figura 24 – Arranjo de medição usado para caracterização experimental de uma antena *patch*.

Na Figura 25 é ilustrado o comparativo dos resultados simulado e medido na faixa de 1 - 7 GHz do parâmetro ($|S_{11}|$) da antenna circular com raio de 20 mm. É possível observar uma boa concordância entre os resultados. Além disso, a antenna apresenta resposta multibanda com seis frequências ressonantes.

Os resultados simulado e medido da antenna circular para a primeira frequência de ressonância, o qual será analisado posteriormente, é mostrado na Figura 26.

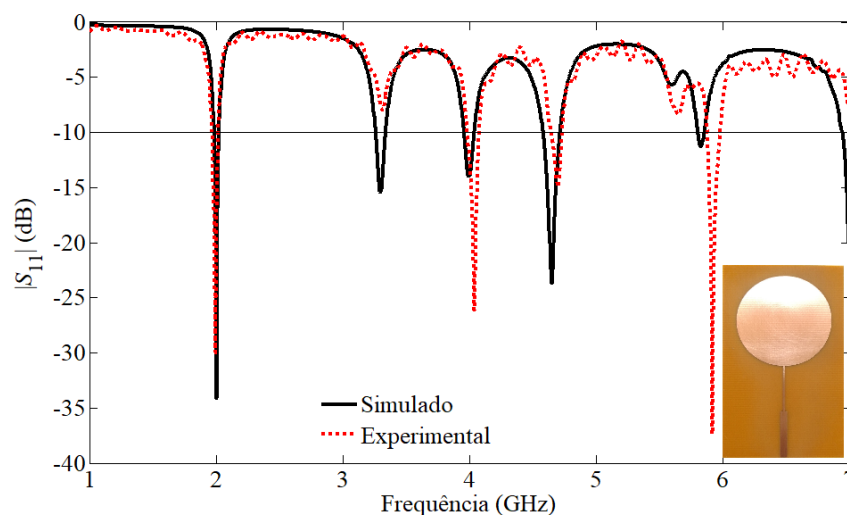


Figura 25 – Resultados simulado e medido do parâmetro $|S_{11}|$ da antenna circular.

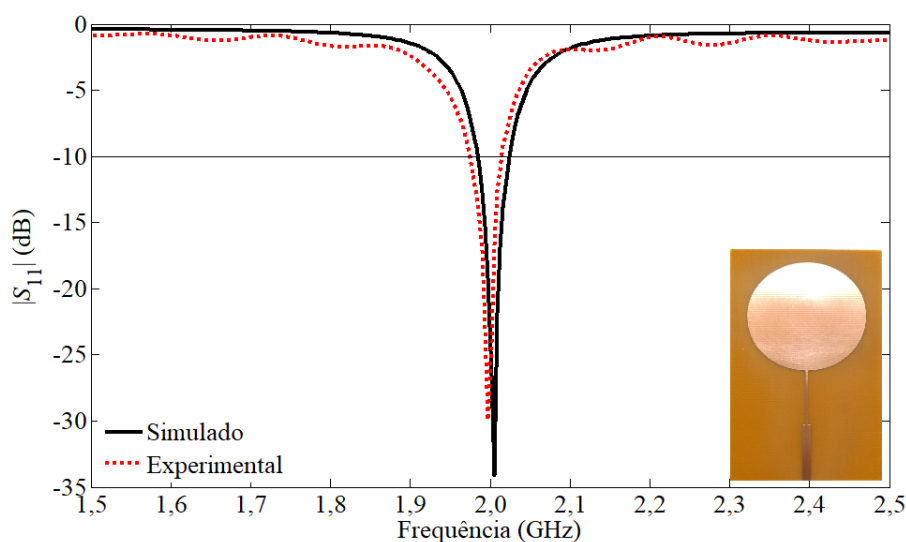


Figura 26 – Resultados simulado e medido da primeira frequência de ressonância da antenna circular.

Os resultados de frequência de ressonância, largura de banda e do coeficiente de reflexão, podem ser visualizados na Tabela 4. Tais resultados apresentam boa concordância, o que indica uma boa confiabilidade no processo de fabricação. Pelos resultados na Tabela, é possível verificar que a largura de banda medida foi de 49

MHz, com uma diferença de 16,66% com relação à simulada, e a diferença entre a frequência de ressonância simulada e medida foi de 0,54 %.

Tabela 4 – Dados simulados e medidos da primeira ressonância da antena circular.

RESULTADO	PARÂMETROS				
	f_r	f_1	f_2	BW	$ S_{11} $
	(MHz)			(MHz)	(dB)
Simulado	2004	1983	2025	42	-34,1
Medido	1993	1971	2017	49	-30,2
Erro %	0,54	0,60	0,39	16,66	-

Na Figura 27 é apresentado o gráfico da impedância de entrada da antena medida sobre a carta de Smith na faixa de frequências de 1,85 – 2,15 GHz. A seta com o número 1, no centro da carta, indica a frequência de ressonância. O resultado demonstra o casamento de impedâncias da antena próximo de 50 Ω .

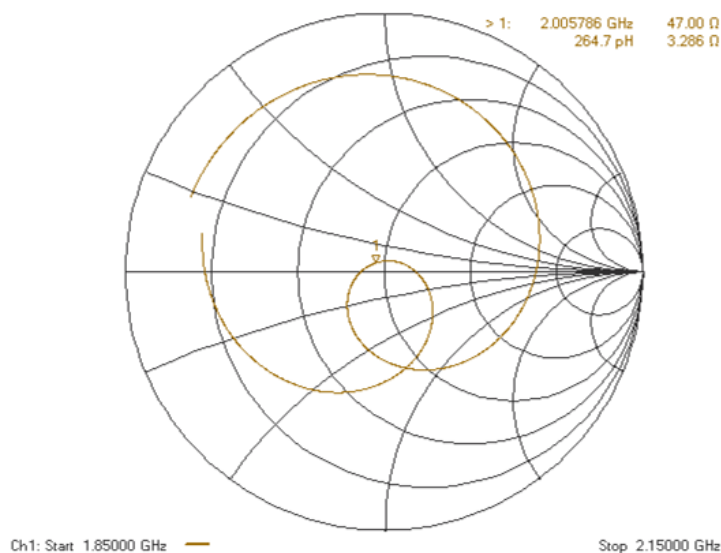


Figura 27 – Gráfico da impedância de entrada da antena circular medida sobre a Carta de Smith.

Os diagramas de irradiação 2-D e 3-D simulados na frequência de ressonância são apresentados na Figura 28. Os seguintes parâmetros de irradiação foram considerados: largura de feixe de meia potência (HPBW), ganho direcional máximo e relação frente-costas (FB), com valores listados na Tabela 5.

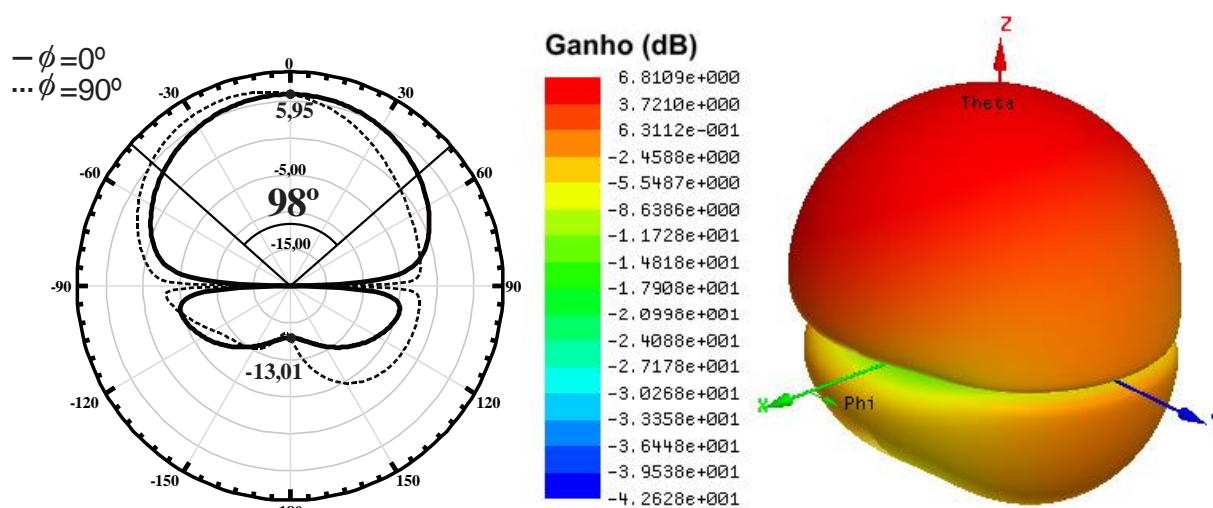


Figura 28 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena circular.

A antena apresentou ganho máximo de 6,81 dB, na direção *broadside*. O ângulo de abertura HPBW, no plano-E, é de aproximadamente 98°.

Tabela 5 – Parâmetros de irradiação da antena circular.

PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO			
Ganho 2-D	Ganho 3-D	HPBW	FB
(dB)	(dB)	(graus)	(dB)
5,95	6,81	98°	18,96

Na Figura 29 pode ser visualizada a distribuição da densidade de corrente superficial e a simulação de campos distantes obtidos para antena circular. Esta antena apresentou uma densidade de corrente máxima de 22,9 A/m², concentrando-se na região central e nas bordas do *patch* circular.

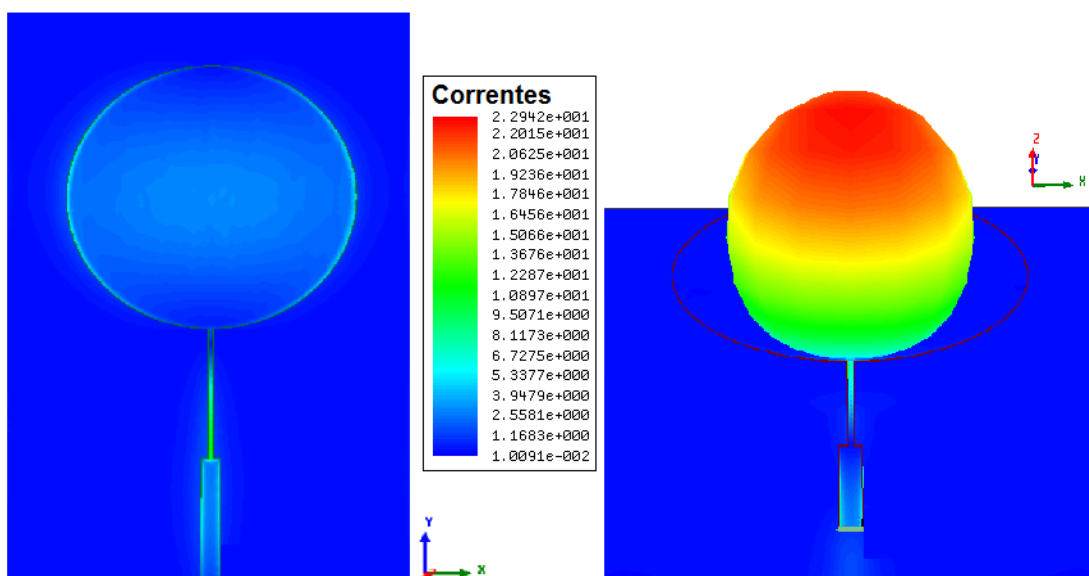


Figura 29 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena *patch* circular.

4.2. Antena de Gielis #1

O protótipo da antena de Gielis #1 foi fabricado utilizando o material da Hitachi como substrato. Os resultados simulado e medido da antena de Gielis #1 para a primeira frequência de ressonância, a qual foi utilizada na análise paramétrica, são representados na Figura 30.

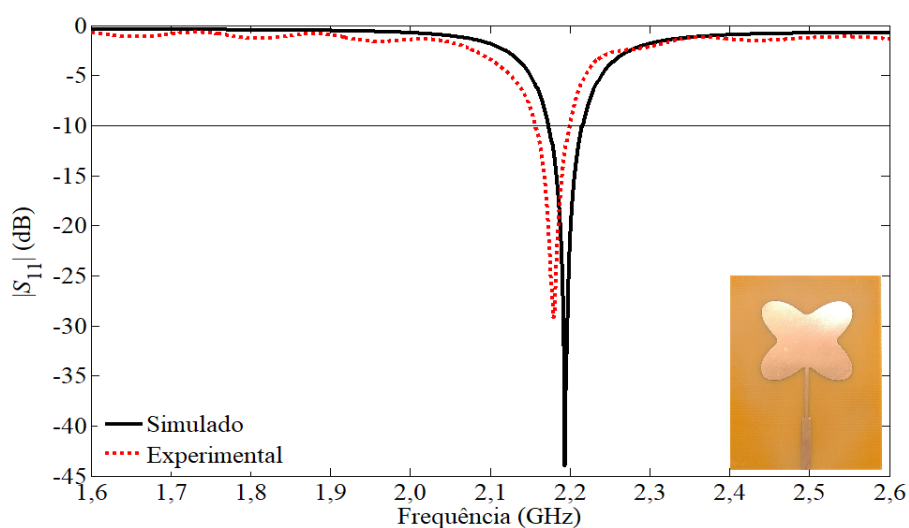


Figura 30 – Resultados simulado e medido da primeira frequência de ressonância da antena de Gielis #1.

Os resultados medidos e simulados são listados na Tabela 6. A frequência de ressonância simulada aumentou em 191 MHz quando comparada com a antena circular. Verifica-se que a largura de banda medida foi de 43 MHz, com um erro de

2,27%. O erro entre a frequência de ressonância simulada e medida foi de 0,72 %. Como a margem de erro entre os resultados é aceitável, torna-se possível a implementação da análise paramétrica com quaisquer dos dados, simulados ou medidos.

Tabela 6 – Dados simulados e medidos da primeira ressonância da antena de Gielis #1.

ANTENA DE GIELIS #1	PARÂMETROS				
	f_r	f_1	f_2	BW	$ S_{11} $
	(MHz)			(MHz)	(dB)
Simulado	2195	2173	2217	44	-42,9
Medido	2179	2157	2200	43	-29,1
Erro %	0,72	0,73	0,76	2,27	-

Na figura 31, é apresentado o gráfico da impedância de entrada da antena de Gielis #1 medida sobre a carta de Smith na faixa de frequências de 2,1 – 2,3 GHz. Percebe-se que há um bom casamento de impedâncias na frequência de ressonância, com uma impedância de entrada de 51,69 Ω .

Os diagramas de irradiação simulados na frequência de ressonância, são apresentados na Figura 32. Pelos valores inseridos na Tabela 7, verifica-se que a antena apresentou um ganho máximo de 6,7 dB, valor característico de antenas de microfita do tipo *patch*.

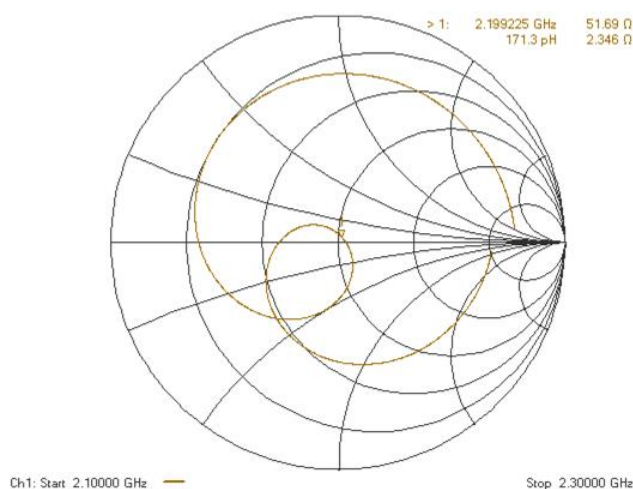


Figura 31 – Gráfico da impedância de entrada da antena de Gielis #1 medida sobre a Carta de Smith.

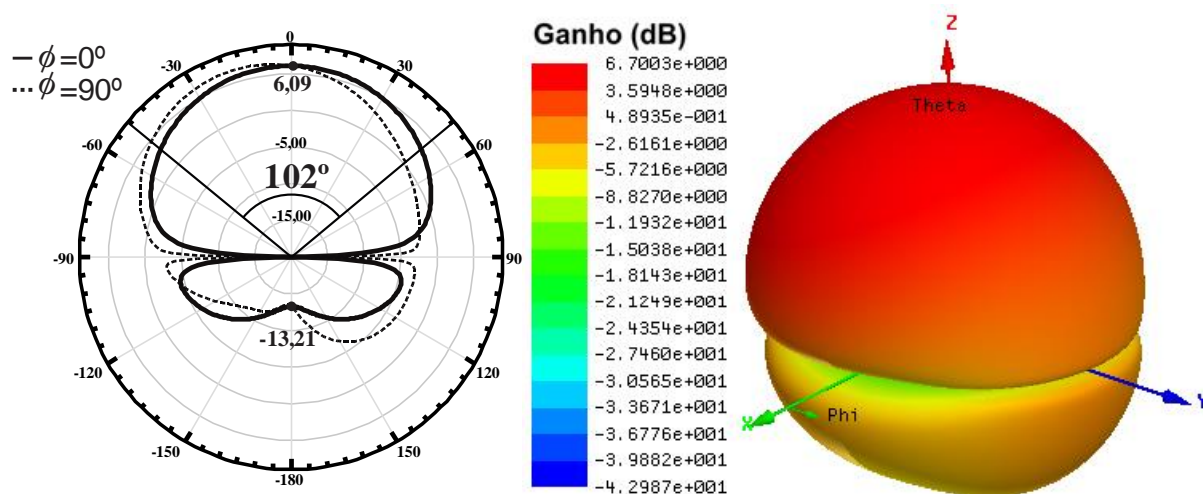


Figura 32 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena de Gielis #1.

Tabela 7 – Parâmetros de irradiação da antena de Gielis #1.

PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO			
Ganho 2-D	Ganho 3-D	HPBW	FB
(dB)	(dB)	(graus)	(dB)
6,09	6,7	102°	19,3

A distribuição da densidade de corrente superficial e a simulação de campos distantes da antena de Gielis #1 estão representados na Figura 33. Nesta antena, a densidade corrente de 47,3 A/m² concentra-se nas bordas do elemento irradiante e é superior ao dobro da encontrada na antena circular.

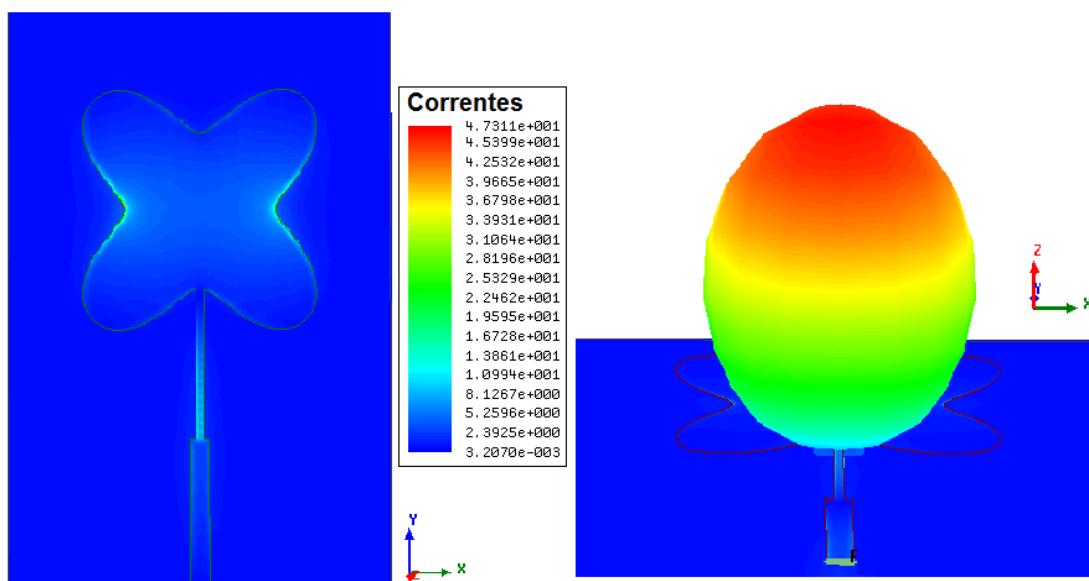


Figura 33 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena de Gielis #1.

4.3. Antena de Gielis #2

O protótipo da antena de Gielis #2 foi fabricado utilizando o material dielétrico da Hitachi, com o raio do elemento *patch* de 20 mm. Os resultados simulado e medido da antena de Gielis #2 para a primeira frequência de ressonância, a qual será utilizada na análise paramétrica, são ilustrados na Figura 34.

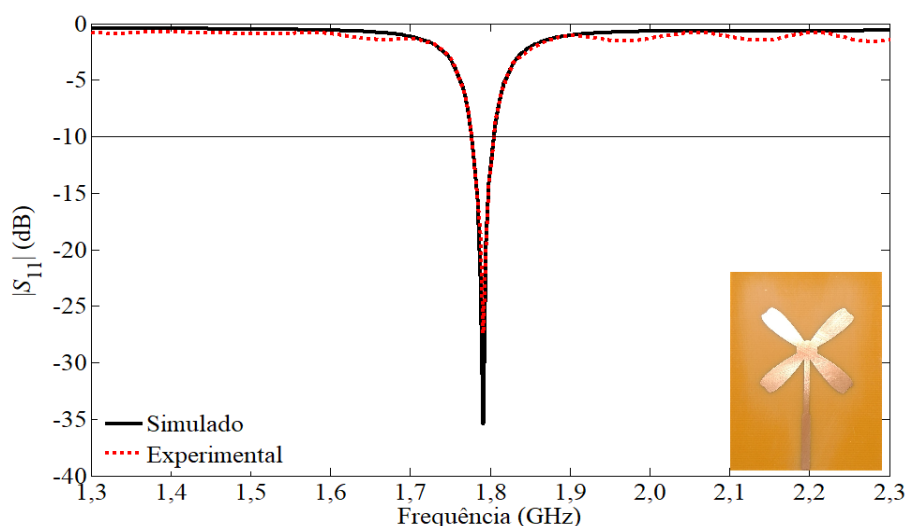


Figura 34 – Resultados simulado e medido da primeira frequência de ressonância da antena de Gielis #2.

De acordo com valores na Tabela 8, verifica-se que a largura de banda medida foi de 27 MHz, com uma diferença de 3,86% com relação à simulada. A diferença entre a frequência de ressonância simulada e medida foi de 0,11 %, portanto, os dados

apresentam uma boa concordância. A frequência de ressonância simulada reduziu em 214 MHz quando comparada com a antena circular.

Tabela 8 – Dados simulados e medidos da primeira frequência de ressonância da antena de Gielis #2.

ANTENA DE GIELIS #2	PARÂMETROS				
	f_r	f_1	f_2	BW	$ S_{11} $
	(MHz)			(MHz)	(dB)
Simulado	1790	1777	1803	26	-35,3
Medido	1792	1779	1806	27	-27,4
Erro %	0,11	0,11	0,16	3,84	-

Na Figura 35, está representado o gráfico da impedância de entrada medida sobre a carta de Smith para a frequência de ressonância de 1,79 GHz da antena de Gielis #2 na faixa de frequências de 1,7 – 1,9 GHz. A seta com o número 1, indica a impedância de 44,34 Ω , na frequência de ressonância.

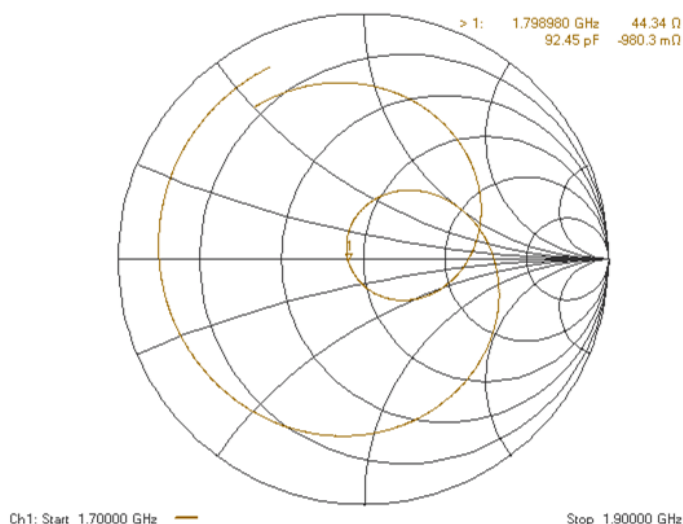


Figura 35 – Gráfico da impedância de entrada da antena de Gielis #2 medido sobre a Carta de Smith.

Os diagramas de irradiação 2-D e 3-D simulados, na frequência de ressonância, são apresentados na Figura 36. Analisando os dados dos parâmetros desta antena, na Tabela 9, destaca-se $FB = 13,1$ dB indicando uma elevada quantidade de irradiação oposta ao lóbulo principal.

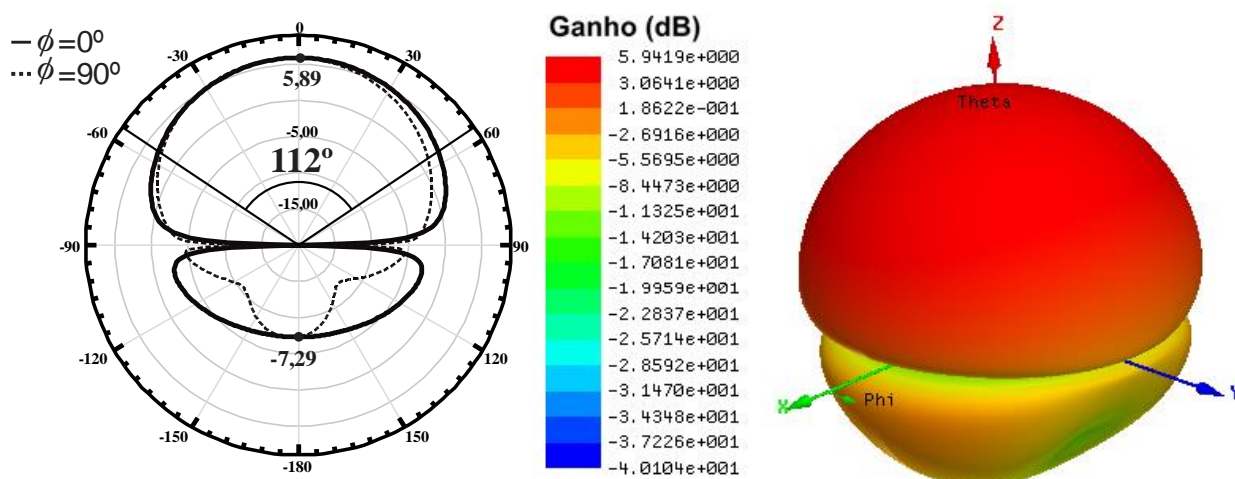


Figura 36 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena de Gielis #2.

Tabela 9 – Parâmetros de irradiação da antena de Gielis #2.

PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO			
Ganho 2-D	Ganho 3-D	HPBW	FB
(dB)	(dB)	(graus)	(dB)
5,89	5,94	112°	13,18

A distribuição da densidade de corrente superficial e campo distante da antena de Gielis #2 estão representados na Figura 37. Nesta antena, a densidade corrente de 193,9 A/m² é bastante elevada, pois concentra-se no centro do *patch*, que possui uma área efetiva menor que a antena circular.

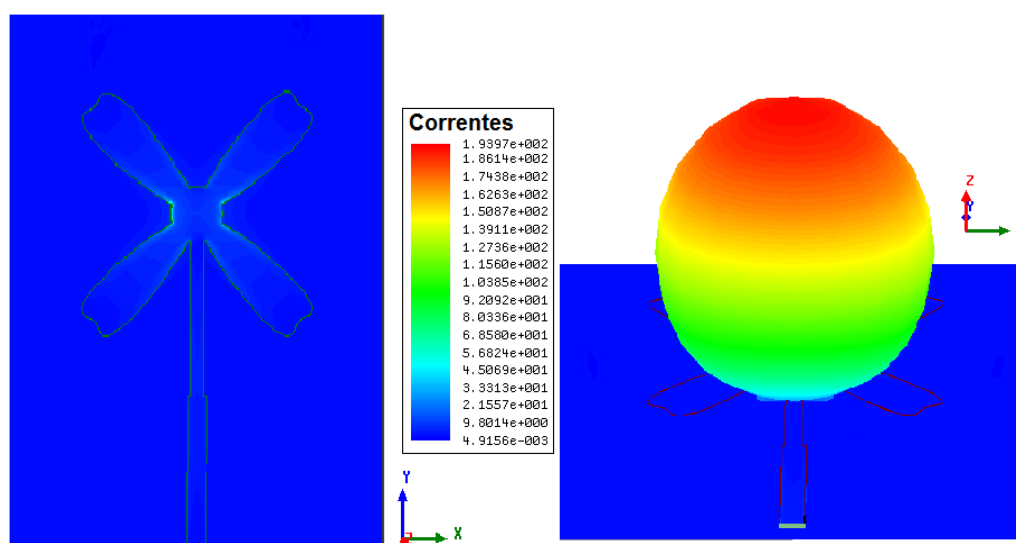


Figura 37 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena de Gielis #2.

4.4. Antena de Gielis #3

O protótipo da antena de Gielis #3 foi fabricado utilizando o substrato da Hitachi. Os resultados simulado e medido da antena de Gielis #3, para a primeira frequência de ressonância, a qual será utilizada na análise paramétrica, são ilustrados na Figura 38.

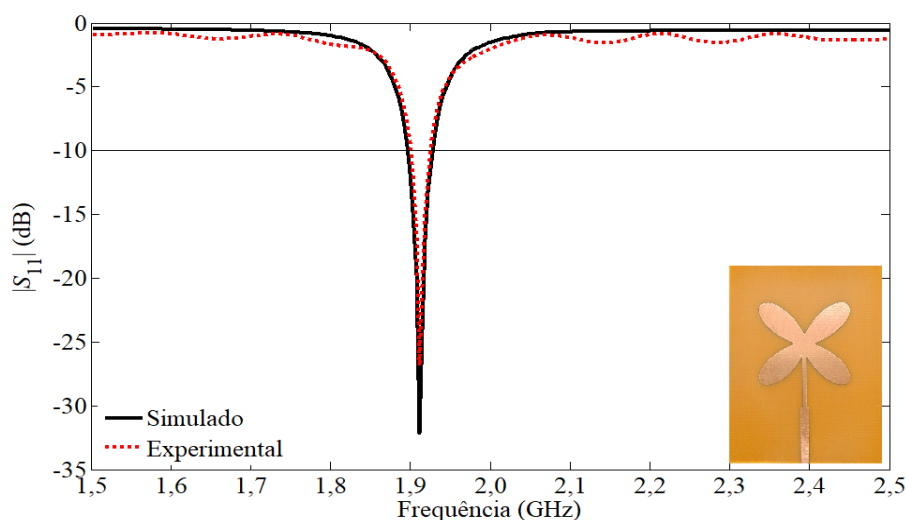


Figura 38 – Resultados simulado e medido da primeira frequência de ressonância da antena de Gielis #3.

Os valores de frequência de ressonância e largura de banda da antena de Gielis #3 estão listados na Tabela 10. Devido à similaridade com o *patch* da antena de Gielis #2, os parâmetros destas antenas também são similares. A exceção é o erro de 16,12% entre a largura de banda simulada e medida da antena de Gielis #3. A frequência de ressonância simulada reduziu em 93 MHz quando comparada com a antena circular.

Tabela 10 – Dados simulados e medidos da primeira frequência de ressonância da antena de Gielis #3.

ANTENA DE GIELIS #3	PARÂMETROS				
	f_r	f_1	f_2	BW	$ S_{11} $
	(MHz)			(MHz)	(dB)
Simulado	1911	1896	1927	31	-32,3
Medido	1913	1900	1926	26	-26,8
Erro %	0,10	0,21	0,05	16,12	-

A impedância de entrada sobre a carta de Smith da antena de Gielis #3 medida para a frequência de ressonância, na faixa de frequências de 1,8 – 2,0 GHz, está ilustrada na Figura 39. O resultado para a frequência de ressonância, indicado pela seta com o número 1, indica um casamento impedâncias próximo de 50 Ω .

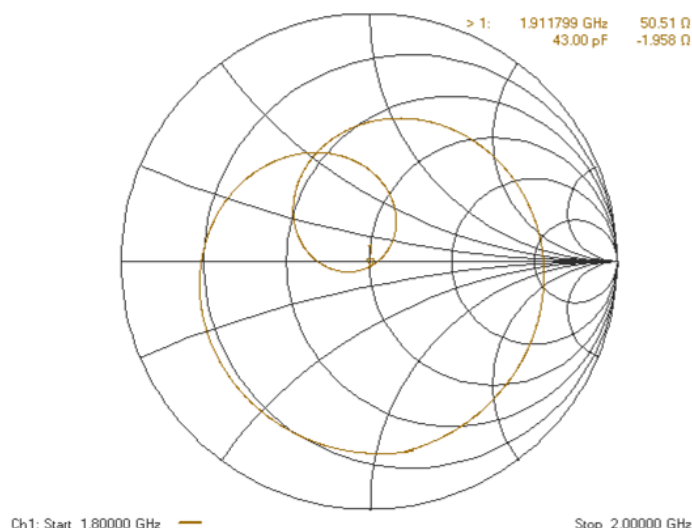


Figura 39 – Gráfico da impedância de entrada da antena de Gielis #3 medida sobre a Carta de Smith.

Os diagramas de irradiação simulados na frequência de ressonância da antena de Gielis #3, com a indicação do ganho e do HPBW, são apresentados na Figura 40. Como observado, na frequência de ressonância, a antena apresentou um ganho típico de antenas de microfita do tipo *patch*.

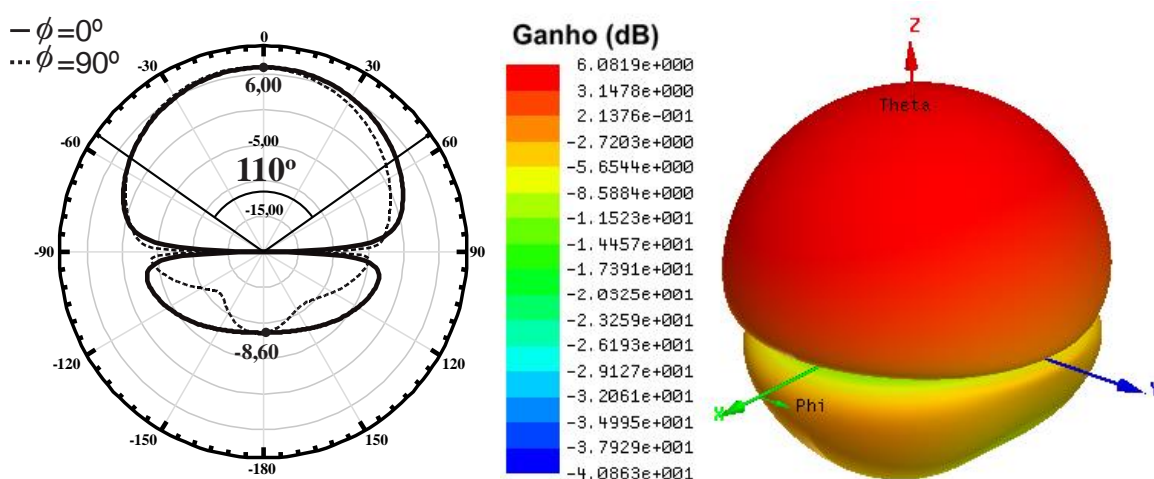


Figura 40 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena de Gielis #3.

Os valores dos parâmetros de irradiação da antena de Gielis #3, estão inseridos na Tabela 11. Como esperado, a relação frente-costas desta antena é inferior ao da antena circular.

Tabela 11 – Parâmetros de irradiação da antena de Gielis #3.

PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO			
Ganho 2-D	Ganho 3-D	HPBW	FB
(dB)	(dB)	(graus)	(dB)
6,0	6,0	110°	14,6

A distribuição da densidade de corrente superficial e a simulação de campos distantes da antena de Gielis #3 estão representados na Figura 41. Nesta antena, a distribuição de corrente ocorre de forma similar à antena de Gielis #2, concentrando-se no centro do elemento irradiante.

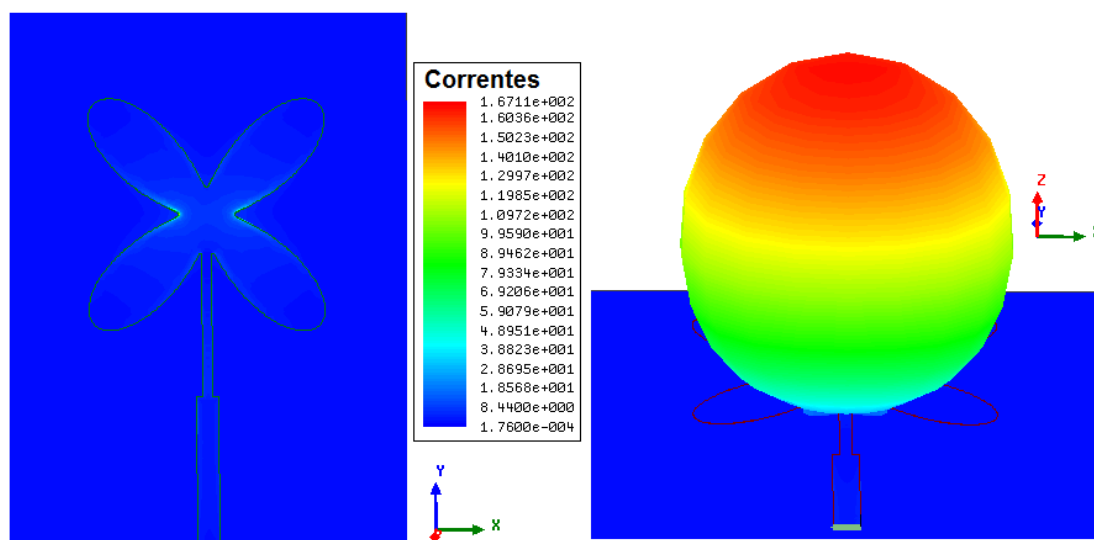


Figura 41 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena de Gielis #3.

4.5. Antena Flor de Lótus

O processo de fabricação da antena bioinspirada na flor de Lótus foi o mesmo das antenas anteriores. A comparação do parâmetro $|S_{11}|$ simulado e medido para o primeiro modo de propagação desta antena pode ser observada na Figura 42. Os dados de frequência de ressonância, largura de banda e perda de retorno estão

inseridos na Tabela 12. A largura de banda medida, desta antena, foi superior à da antena circular. A frequência de ressonância simulada aumentou em 500 MHz quando comparada com a antena circular.

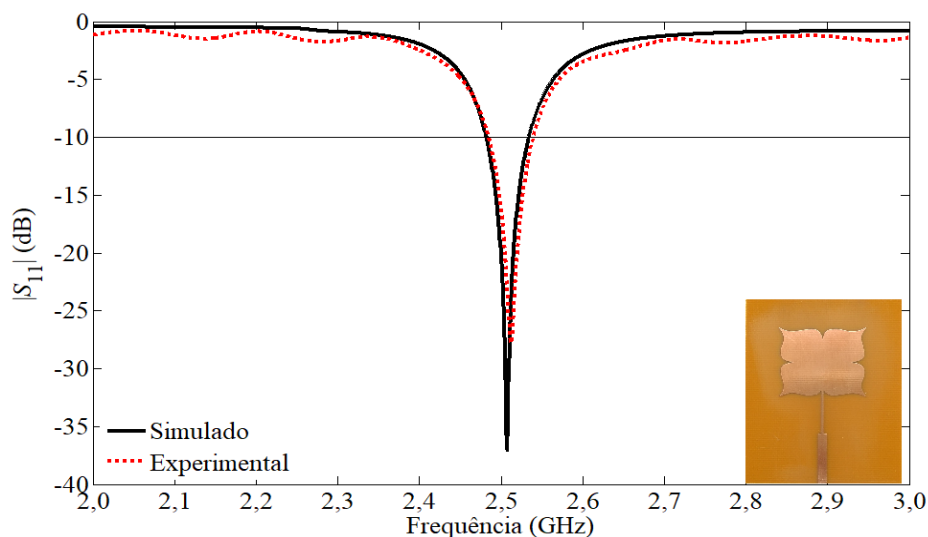


Figura 42 – Resultados simulado e medido da primeira frequência de ressonância da antena flor de Lótus.

O erro percentual entre os dados de largura de banda e frequência de ressonância, inseridos na Tabela 12, são aceitáveis, o que valida uma análise paramétrica realizada com os dados simulados desta antena.

Tabela 12 – Dados simulados e medidos da primeira frequência de ressonância da antena flor de Lótus.

ANTENA FLOR DE LÓTUS	PARÂMETROS				
	f_r	f_1	f_2	BW	$ S_{11} $
	(MHz)			(MHz)	(dB)
Simulado	2504	2477	2531	54	-36,9
Medido	2512	2485	2538	53	-27,7
Erro %	0,31	0,32	0,27	1,85	-

O gráfico da impedância de entrada sobre a carta de Smith da antena flor de Lótus medida para a frequência de ressonância, na faixa de frequências de 2,4 – 2,6 GHz, pode ser visualizada na Figura 43. O resultado para a frequência de ressonância, indicado pela seta, indica uma impedância de entrada de 50,75 Ω .

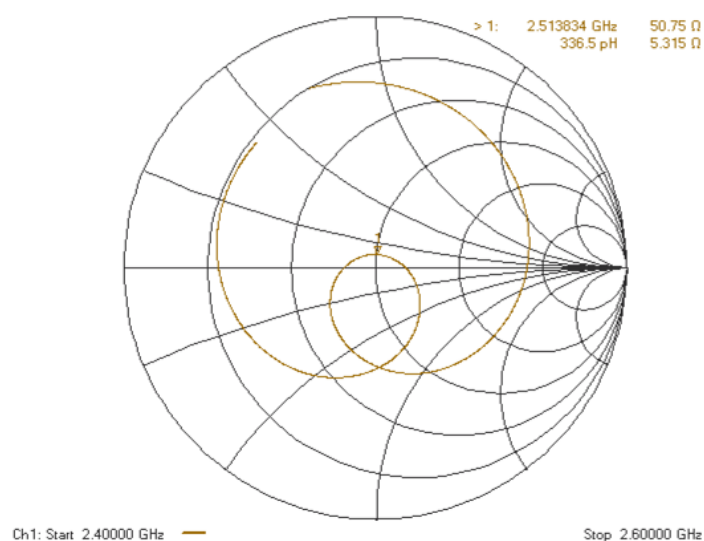


Figura 43 – Gráfico da impedância de entrada da antena bioinspirada na flor de Lótus medida sobre a Carta de Smith.

Os diagramas 2-D e 3-D da antena flor de Lótus, com a indicação do ganho e do HPBW, são apresentados na Figura 44. Destaca-se um ganho máximo de 7,18 dB, superior ao das outras antenas. Em consequência, a relação frente-costas, visualizada na Tabela 13, é a maior entre as antenas analisadas até aqui, indicando que a irradiação oposta ao lóbulo principal é menor.

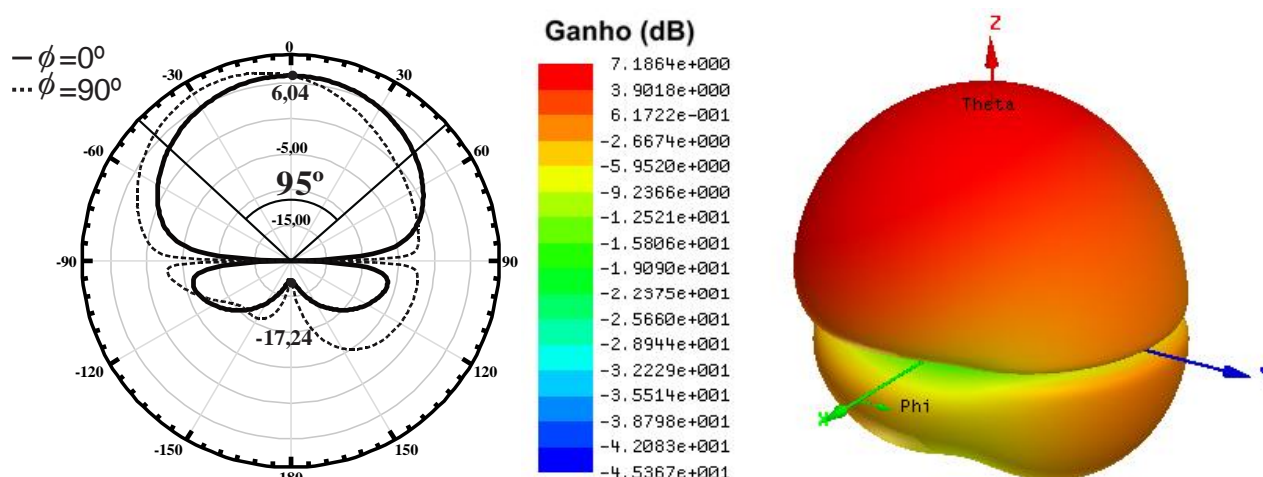


Figura 44 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena flor de Lótus.

Tabela 13 – Parâmetros de irradiação da antena flor de Lótus.

PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO			
Ganho 2-D	Ganho 3-D	HPBW	FB
(dB)	(dB)	(graus)	(dB)
6,04	7,18	95°	23,28

Na Figura 45 pode ser visualizada a distribuição da densidade de corrente superficial e a simulação de campos distantes na antena flor de Lótus. Esta antena apresentou uma máxima densidade de corrente de 25,7 A/m², valor próximo ao apresentado na antena circular.

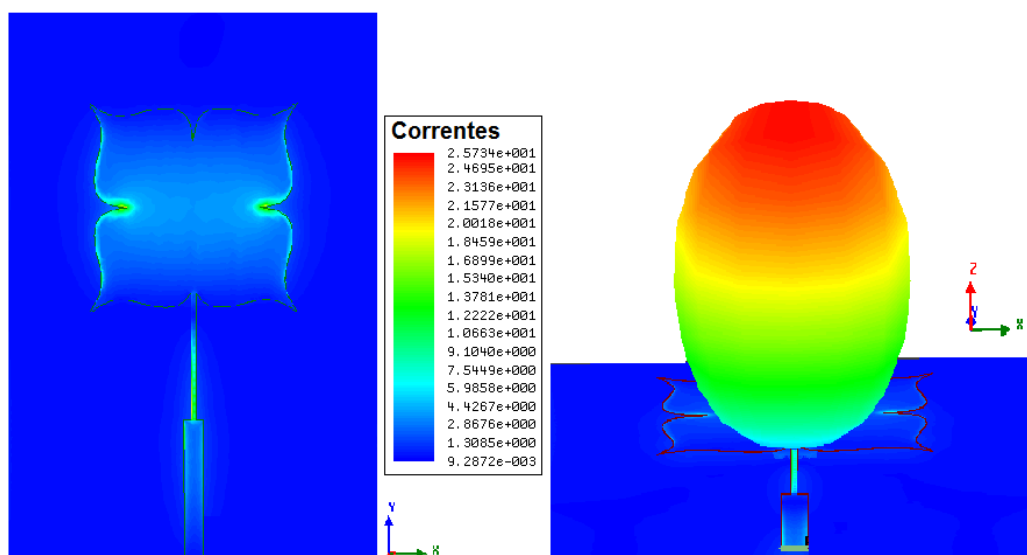


Figura 45 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena flor de Lótus.

4.6. Antena Vestível

O protótipo da antena vestível foi fabricado utilizando o *jeans* como substrato, com espessura $h = 0,75$ mm, permissividade elétrica relativa, $\epsilon_r = 1,75$ e tangente de perdas, $\delta = 0,08$.

Os resultados do parâmetro $|S_{11}|$ simulado e medido podem ser observados na Figura 46. Os valores de frequência de ressonância (f_r), primeira frequência a -10 dB (f_1), segunda frequência a -10 dB (f_2), largura de banda e perda de retorno são listados na Tabela 14. A concordância entre os valores da primeira ressonância é aceitável, apesar das diferenças nas frequências de ressonâncias de

0,28% e 8,61% na largura de banda. Na segunda ressonância, a diferença entre os resultados simulados e medidos, podem ser atribuídas a diferença na permissividade do substrato dielétrico. Haja visto que na simulação, foi considerada uma permissividade, $\epsilon_r = 1,75$, valor aproximado para a frequência de projeto de 3,5 GHz, todavia a permissividade em torno de 5,4 GHz é aproximadamente, $\epsilon_r = 2$. Estes valores de permissividade foram observados na caracterização experimental do substrato na Figura 20.

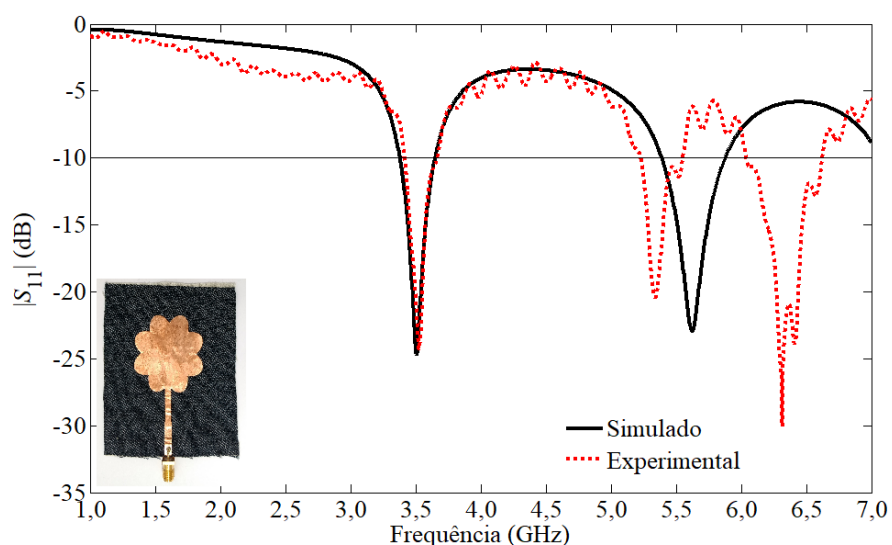


Figura 46 – Resultados simulado e medido do parâmetro $|S_{11}|$ da antena vestível.

Tabela 14 – Dados simulados e medidos da 1ª e 2ª ressonância da antena vestível.

ANTENA VESTÍVEL	PARÂMETROS NA 1ª RESSONÂNCIA				
	f_r	f_1	f_2	BW	$ S_{11} $
	(MHz)			(MHz)	(dB)
Simulado	3514	3381	3648	267	-23,9
Medido	3524	3419	3663	244	-22,9
Erro %	0,28	1,12	0,41	8,61	-
	PARÂMETROS NA 2ª RESSONÂNCIA				
	f_r	f_1	f_2	BW	$ S_{11} $
	(MHz)			(MHz)	(dB)
Simulado	5628	5395	5875	480	22,9
Medido	5343	5226	5481	255	20,4
Erro %	5,06	3,13	6,70	46,8	-

A antena com substrato *jeans* apresentou uma largura de banda maior do que as antenas de microfita convencionais, sendo suficiente para cobrir toda a faixa de frequência de 3,4 – 3,6 GHz. Isso deve-se a utilização do substrato com baixa permissividade.

O gráfico da impedância de entrada da antena vestível medida sobre a carta de Smith para a primeira ressonância, na faixa de frequências de 3,4 – 3,6 GHz, pode ser visualizada na Figura 47. A impedância de entrada é de 51,69 Ω .

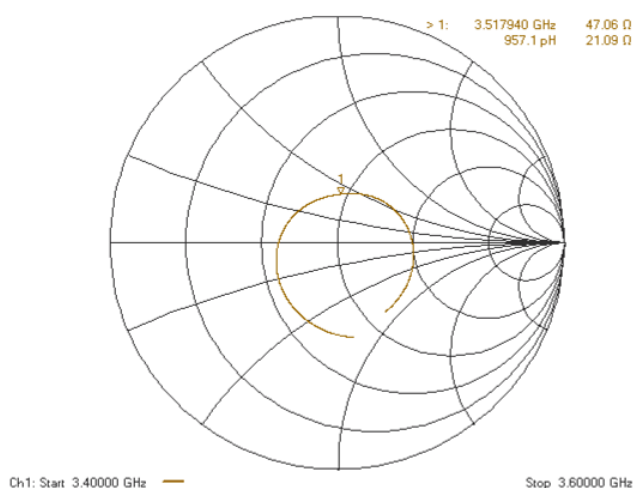


Figura 47 – Gráfico da impedância de entrada da antena vestível medida sobre a Carta de Smith.

Os diagramas 2-D e 3-D simulados na frequência de 3,51 GHz, com a indicação do ganho e do HPBW, são ilustrados na Figura 48. Destaca-se um ganho máximo de 7,68 dB, superior ao das outras antenas com substrato Hitachi.

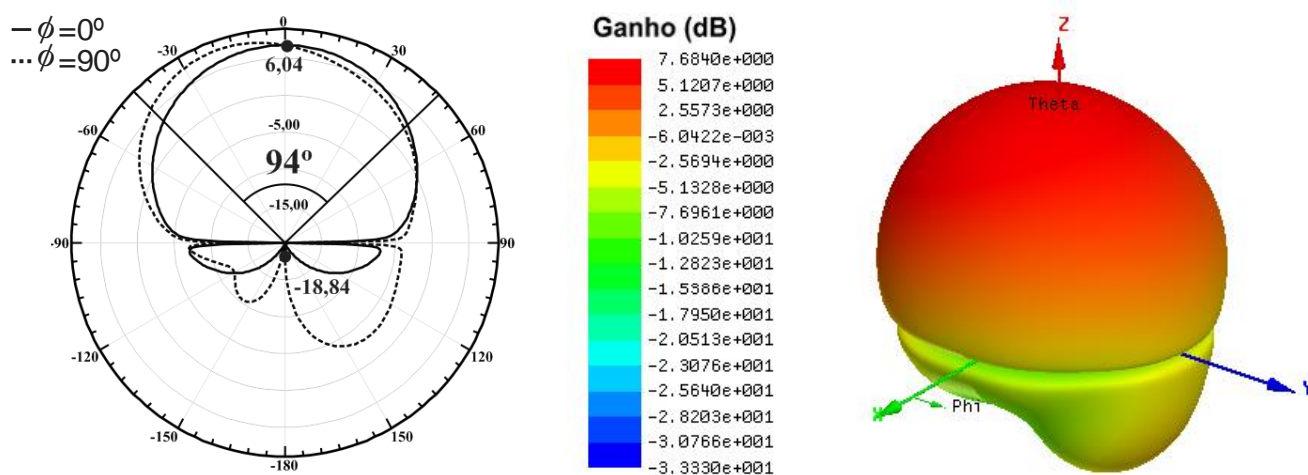


Figura 48 – Diagramas de irradiação 2-D e 3-D da antena vestível.

Tabela 15 – Parâmetros de radiação da antena vestível em 3,51 GHz.

PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE PROJETO			
Ganho 2-D (dB)	Ganho 3-D (dB)	HPBW (graus)	FB (dB)
6,71	7,68	94°	25,55

Na Figura 49 pode ser visualizada a distribuição da densidade de corrente superficial e a simulação de campos distantes na antena vestível na frequência simulada em 3,51 GHz. Esta antena apresentou uma densidade de corrente máxima de 13,6 A/m².

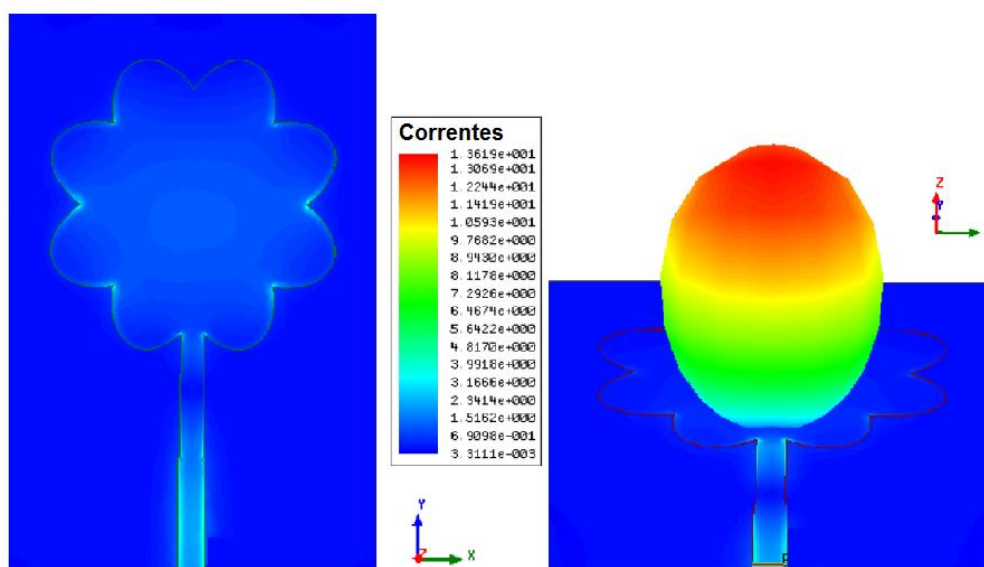


Figura 49 – Densidade de corrente superficial e campo distante da antena vestível em 3,51 GHz.

4.7. Análise Paramétrica das Antenas *Patch* Propostas

Nesta seção são apresentados os resultados de análises paramétricas realizadas para as antenas *patch* propostas. Esta análise é feita considerando-se a frequência de ressonância e largura de banda em função do raio e do número de pétalas para as antenas projetadas com os seguintes tipos de elementos irradiantes: Gielis #1; Gielis #2; Gielis #3; Lótus.

Considerando que os elementos irradiantes das antenas mencionadas são rosáceas cujo número de pétalas é definido pelo parâmetro m , propõe-se a análise dos dados de frequências de ressonância e de largura de banda para quatro variações do raio dos elementos irradiantes no intervalo de 8 – 20 mm. Para cada raio considerado, varia-se o número de pétalas com dez variações no intervalo de 4 – 40 pétalas. Para a realização das análises, foram utilizados dados simulados do modo fundamental (primeira ressonância) das antenas projetadas.

A variação na frequência de ressonância com a mudança do raio e do número de pétalas, para as antenas de Gielis #1, é ilustrada na Figura 50. Cada curva contém dados das antenas com um mesmo raio. Cada ponto da curva, representa uma variação no número de pétalas. Desta forma, foram analisadas 40 antenas para cada tipo de *patch* proposto.

Nesta análise, observa-se que frequência de ressonância é reduzida com o aumento do número de pétalas, entretanto reduziu menos do que o esperado, tendo em vista o aumento do perímetro do *patch* das antenas. Este comportamento é observado para todos os raios. A maior variação da frequência de ressonância ao longo da faixa de variação de pétalas foi de 795 MHz, para um raio de 8 mm. Em termos percentuais, essa variação foi de 15,1 %. O valor mínimo de frequência de ressonância foi de 1,85 GHz, para um raio de 20 mm, e o máximo foi de 5,29 GHz, para um raio de 8 mm, como esperado.

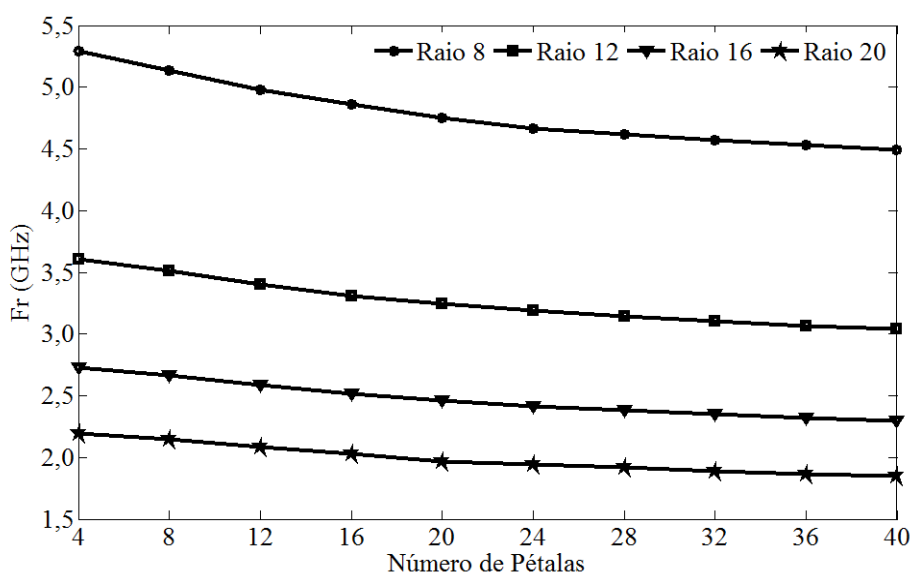


Figura 50 – Análise paramétrica da frequência de ressonância para das antenas de Gielis #1.

Na Figura 51 é apresentada a análise paramétrica da largura de banda com a variação do raio e do número de pétalas das antenas com os elementos irradiantes de Gielis #1. A largura de banda é reduzida com o aumento no número de pétalas para todos os raios, comportamento similar ao encontrado na análise da frequência de ressonância. A maior variação da largura de banda foi para o raio de 8 mm, variando em 50 MHz. Em termos percentuais, essa variação foi de 32,9 %. A maior largura de banda foi da antena com 4 pétalas e raio de 8 mm, apresentando 152 MHz, e a menor foi da antena com 40 pétalas e raio de 20 mm, apresentando 31 MHz.

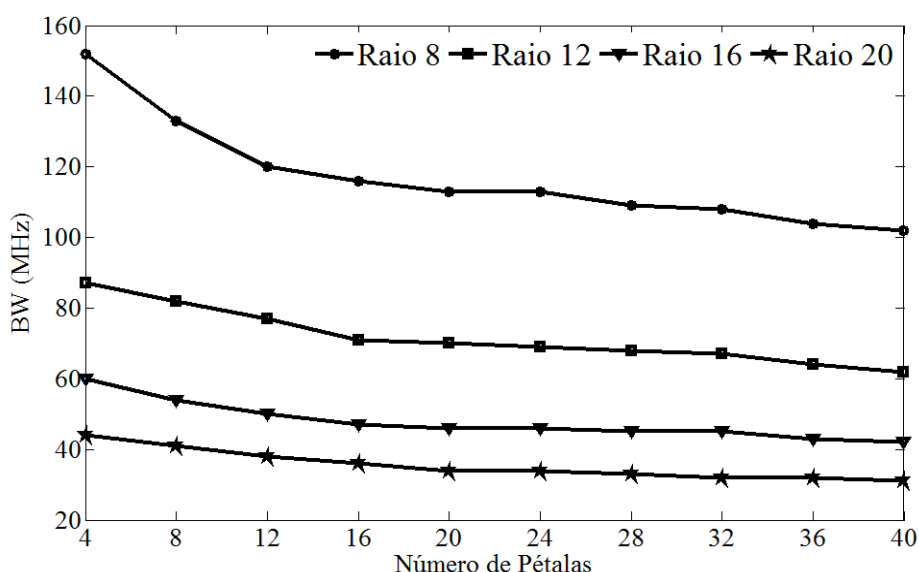


Figura 51 – Análise paramétrica da largura de banda para as antenas de Gielis #1.

A variação na frequência de ressonância com a mudança do raio e do número de pétalas para as antenas de Gielis #2 é ilustrada na Figura 52. A tendência de redução na frequência de ressonância com o aumento do número de pétalas também é observada para esta análise. A maior variação da frequência de ressonância ao longo da faixa de variação de pétalas foi de 733 MHz, para o raio de 8 mm. Em termos percentuais, essa variação foi de 16,7 %. O valor mínimo de frequência de ressonância foi de 1,49 GHz, da antena com 40 pétalas e raio de 20 mm, e o máximo foi de 4,4 GHz, da antena com 4 pétalas e raio de 8 mm.

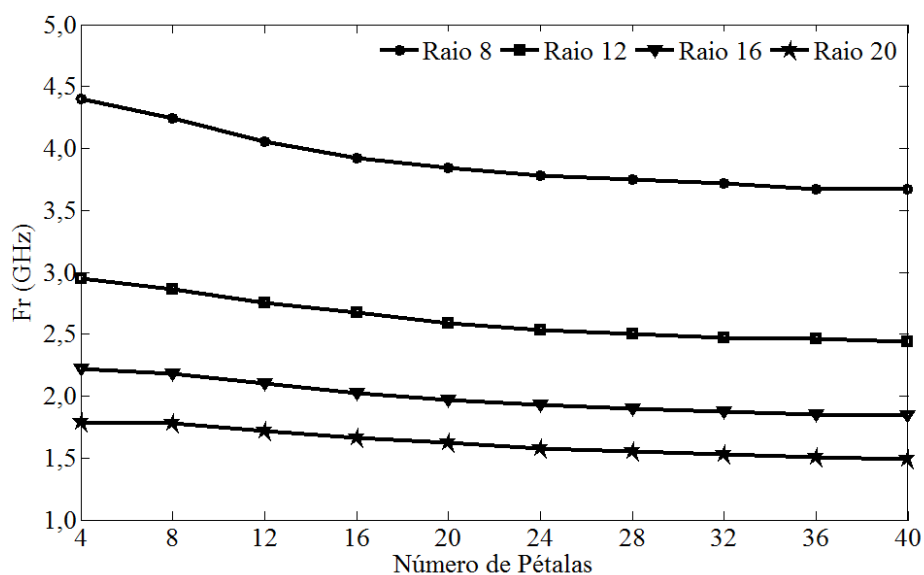


Figura 52 – Análise paramétrica da frequência de ressonância para as antenas de Gielis #2.

Na Figura 53, é ilustrada a análise paramétrica da largura de banda das antenas com elementos irradiantes de Gielis #2.

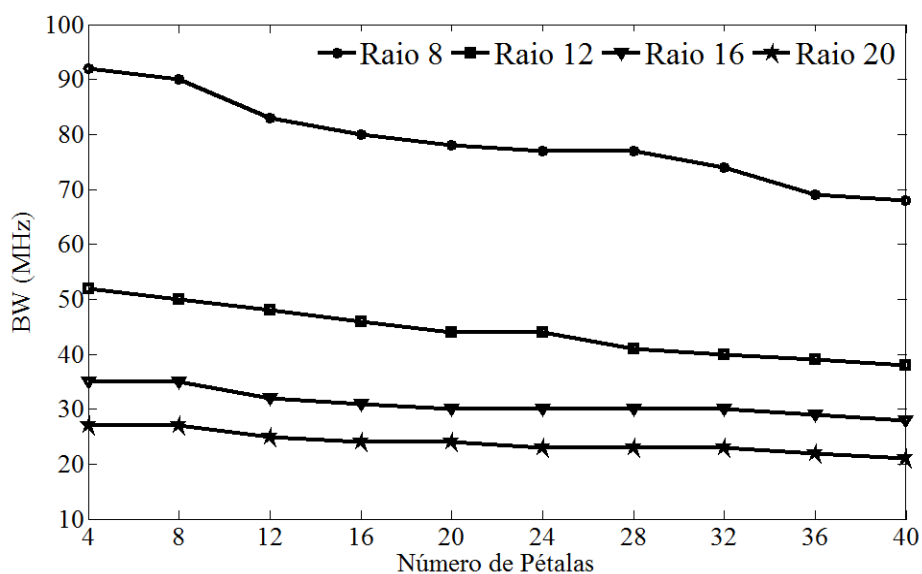


Figura 53 – Análise paramétrica da largura de banda para as antenas de Gielis #2.

A largura de banda é reduzida com o aumento no número de pétalas para todos os raios, comportamento similar ao encontrado na análise da largura de banda das antenas de Gielis #1. A maior variação da largura de banda foi observada para o raio de 8 mm, variando em 24 MHz. Em termos percentuais, essa variação foi de 26,1 %. A maior largura de banda foi da antena com 4 pétalas e raio de 8 mm, apresentando 93 MHz, e a menor foi da antena com 40 pétalas e raio de 20 mm, obtendo 21 MHz.

A variação na frequência de ressonância com a mudança do raio e do número de pétalas para os elementos *patch* das antenas de Gielis #3 é ilustrada na Figura 54. Como esperado, há a redução da frequência de ressonância com o aumento do número de pétalas. A maior variação da frequência de ressonância ao longo da faixa de variação de pétalas foi de 1056 MHz, para o raio de 8 mm. Em termos percentuais, essa variação foi de 21,6 %. O valor mínimo de frequência de ressonância foi de 1,50 GHz, para a antena com 40 pétalas e raio de 20 mm, e o máximo foi de 4,88 GHz, para antena com 4 pétalas e raio de 8 mm.

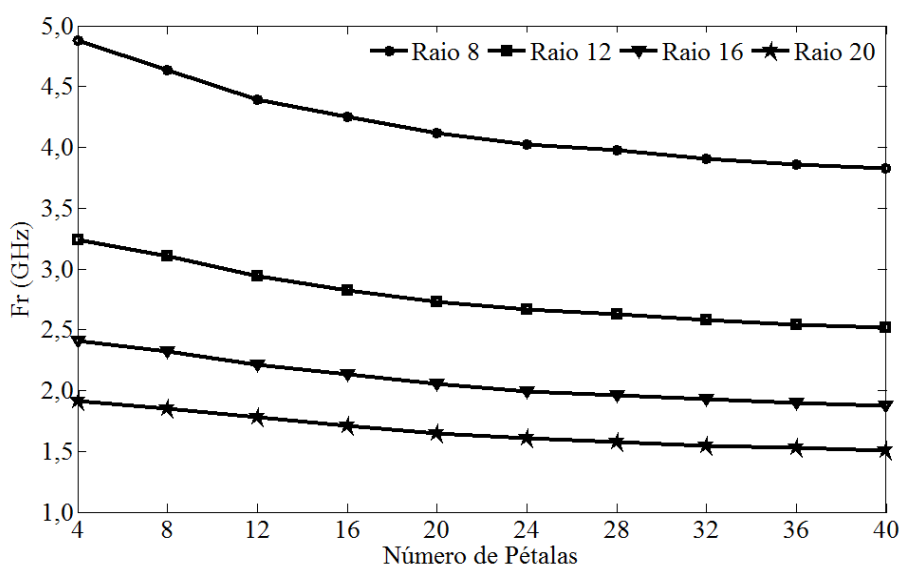


Figura 54 – Análise paramétrica da frequência de ressonância para as antenas de Gielis #3.

Na Figura 55 é ilustrada a análise paramétrica da largura de banda com a variação do raio e do número de pétalas das antenas de Gielis #3. A largura de banda é reduzida com o aumento no número de pétalas para todos os raios, como esperado. A maior variação da largura de banda foi para o raio de 8 mm, variando em 26 MHz. A maior largura de banda foi para antena com 4 pétalas e raio de 8 mm, obtendo 101 MHz, e a menor foi da antena com 40 pétalas e raio de 20 mm, apresentando 23 MHz. Os resultados desta análise são equivalentes aos das antenas de Gielis #2, haja vista a semelhança entre os elementos irradiantes.

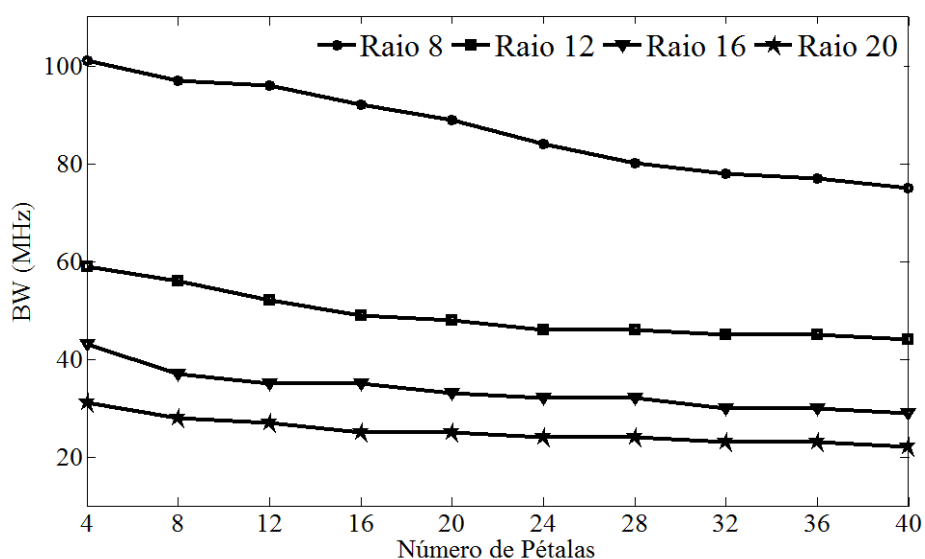


Figura 55 – Análise paramétrica da largura de banda para as antenas de Gielis #3.

O resultado da análise paramétrica da frequência de ressonância, para as antenas com os elementos irradiantes bioinspirados na flor de Lótus, é ilustrado na Figura 56. Uma característica divergente desta análise em relação às outras, é uma oscilação na frequência de ressonância para todos os raios, embora uma tendência de redução da frequência de ressonância com a adição do número de pétalas também seja observada.

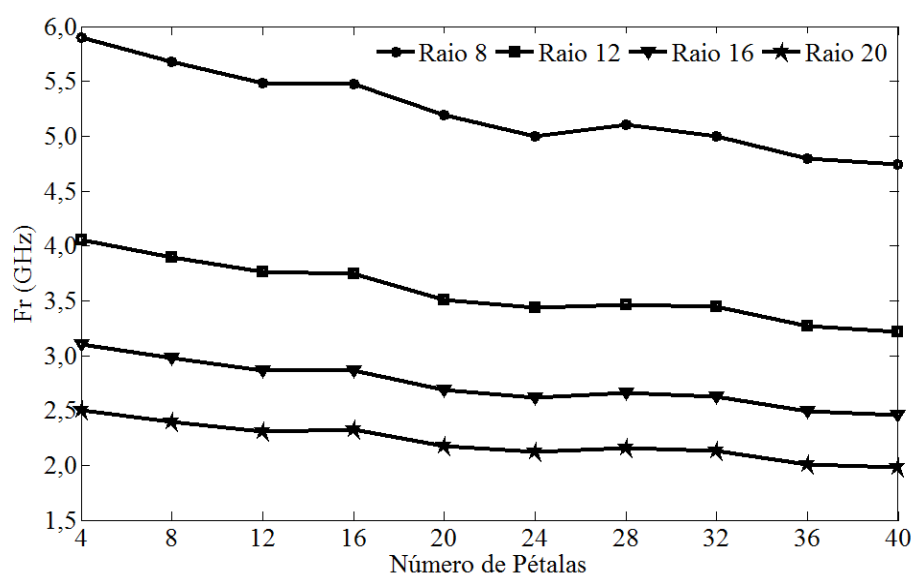


Figura 56 – Análise paramétrica da frequência de ressonância para as antenas bioinspiradas na flor de Lótus.

A maior variação da frequência de ressonância ao longo da faixa de variação de pétalas foi 1157 MHz, para o raio de 8 mm. O valor mínimo de frequência de ressonância foi de 1,97 GHz, da antena com 40 pétalas e raio de 20 mm, e o máximo foi de 5,90 GHz, da antena com 4 pétalas e raio de 8 mm. Em termos numéricos, a análise das antenas bioinspiradas na flor de Lótus, para o raio de 8 mm, foi a que apresentou a maior variação. Em termos percentuais, apresentou uma variação de 19,6 %. Embora não tenha apresentado a maior variação numérica para o raio de 8 mm, a análise das antenas de Gielis #3, foi a que apresentou a maior redução percentual, com 21,6%.

Na Figura 57 é ilustrada a análise paramétrica da largura de banda das antenas com os elementos irradiantes bioinspirados na flor de Lótus. A maior variação da largura de banda foi das antenas com o raio de 8 mm, variando em 65 MHz. A maior largura de banda foi da antena com 4 pétalas e raio de 8 mm, obtendo 167 MHz, e a menor foi da antena com 40 pétalas e raio de 20 mm, obtendo 34 MHz. Os resultados da análise com as antenas bioinspiradas na flor de Lótus são similares aos da análise das antenas de Gielis #1, fato atribuído à semelhança entre os elementos irradiantes. A análise da largura de banda com as antenas bioinspiradas na flor de Lótus foi a que apresentou a maior redução percentual para o raio de 8 mm, variando 39%.

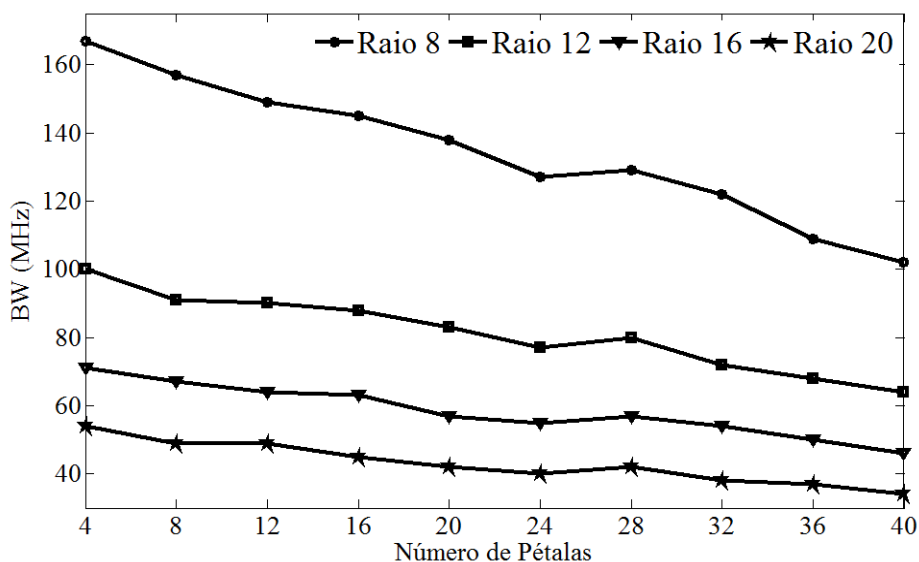


Figura 57 – Análise paramétrica da largura de banda para as antenas bioinspiradas na flor de Lótus.

4.8. Análise Paramétrica do Número de Ressonâncias em Relação ao Número de Pétalas

Nesta seção são apresentados os resultados de análises paramétricas realizadas para as antenas *patch* propostas. Esta análise é feita considerando-se o número de frequências de ressonância em função do número de pétalas para as antenas projetadas com os seguintes tipos de elementos irradiantes: Gielis #1; Gielis #2; Gielis #3; Lótus.

Nesta análise foram considerados os resultados simulados de todas as antenas analisadas para os quatro tipos de elementos *patch* considerados. Para cada tipo, foram selecionados cinco protótipos para serem fabricadas. O raio escolhido foi o de 20 mm, pois estas antenas apresentam a primeira frequência de ressonância próxima ao início da faixa considerada, com isso, apresentam mais ressonâncias na faixa de 1 - 7 GHz. Na validação dos resultados simulados foram utilizados protótipos de antenas com, 4, 12, 24, 32 e 40 pétalas.

O comparativo dos resultados simulados e medidos, para as antenas com quatro pétalas, podem ser visualizados na Figura 58. A resposta multibanda obtida com essas antenas com elementos polares, potencializa um maior número de aplicações. Em todas as antenas com 4 pétalas, é possível identificar ressonâncias com aplicações em 5,8 GHz.

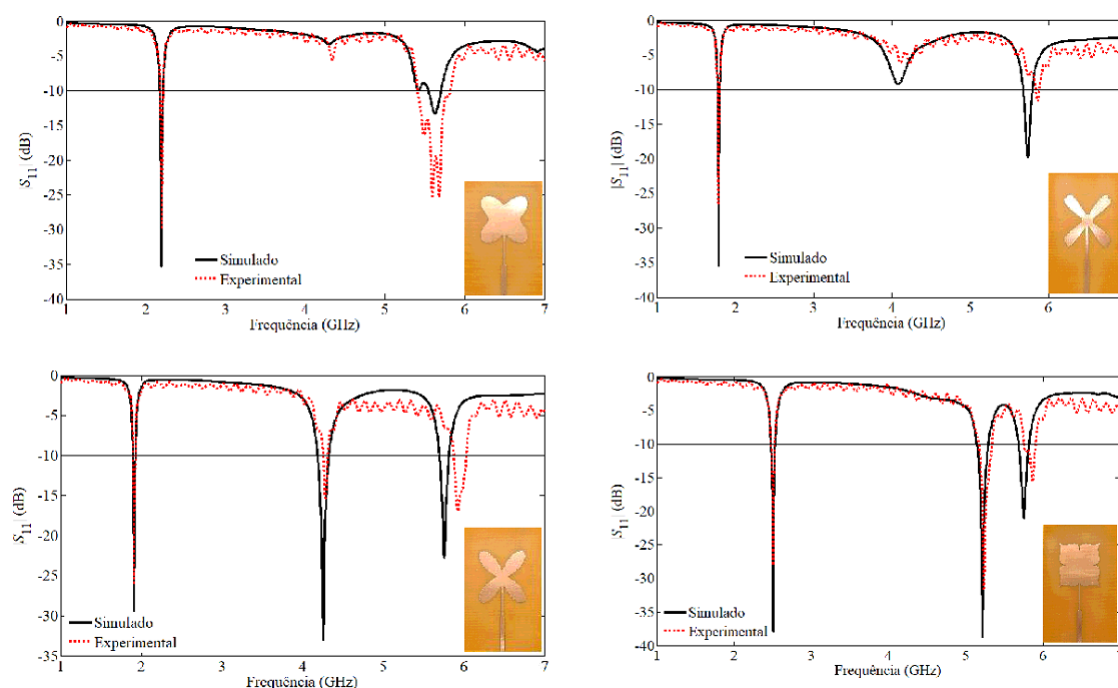


Figura 58 – Resultados simulados e medidos do parâmetro $|S_{11}|$ para os tipos de *patch* com 4 pétalas.

Na Figura 59, podem ser visualizados os resultados simulados e medidos para os protótipos das antenas com 12 pétalas em seus elementos irradiantes. Os resultados apresentam boa concordância.

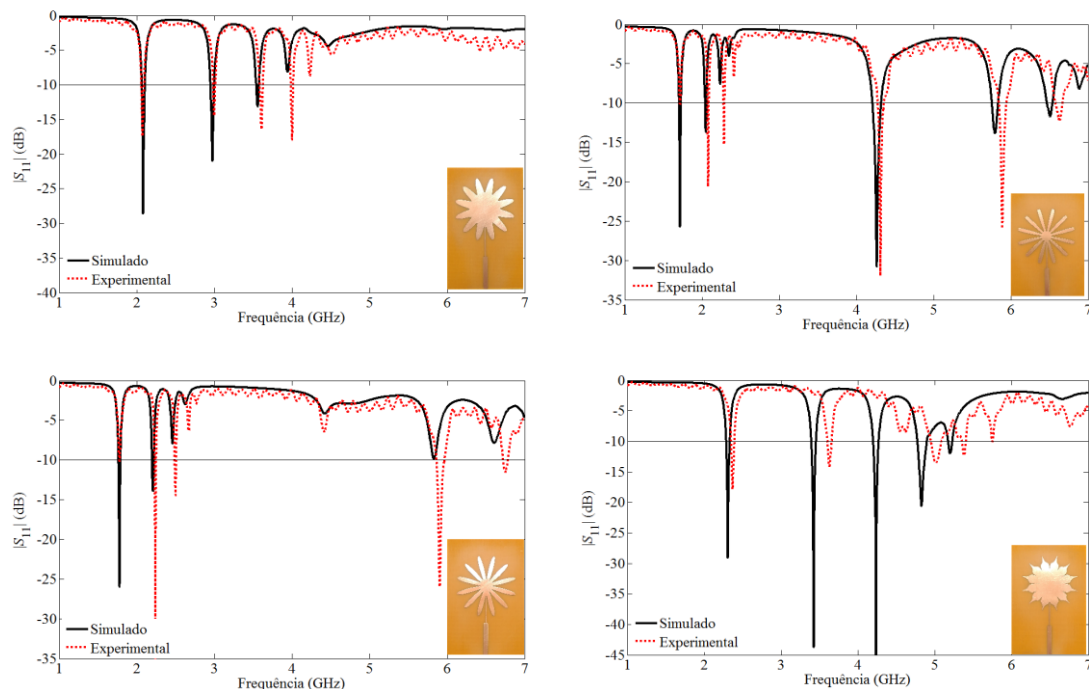


Figura 59 – Resultados simulados e medidos do parâmetro $|S_{11}|$ para os tipos de *patch* com 12 pétalas.

Os resultados simulados e experimentais para os protótipos das antenas com 24 pétalas nos elementos irradiantes, podem ser observados na Figura 60. Os resultados apresentam boa concordância, com exceção do protótipo bioinspirado na flor de lótus. Devido às pontas finas desses elementos irradiantes, houve uma imprecisão no processo de fabricação por corrosão, deslocando a resposta em frequência.

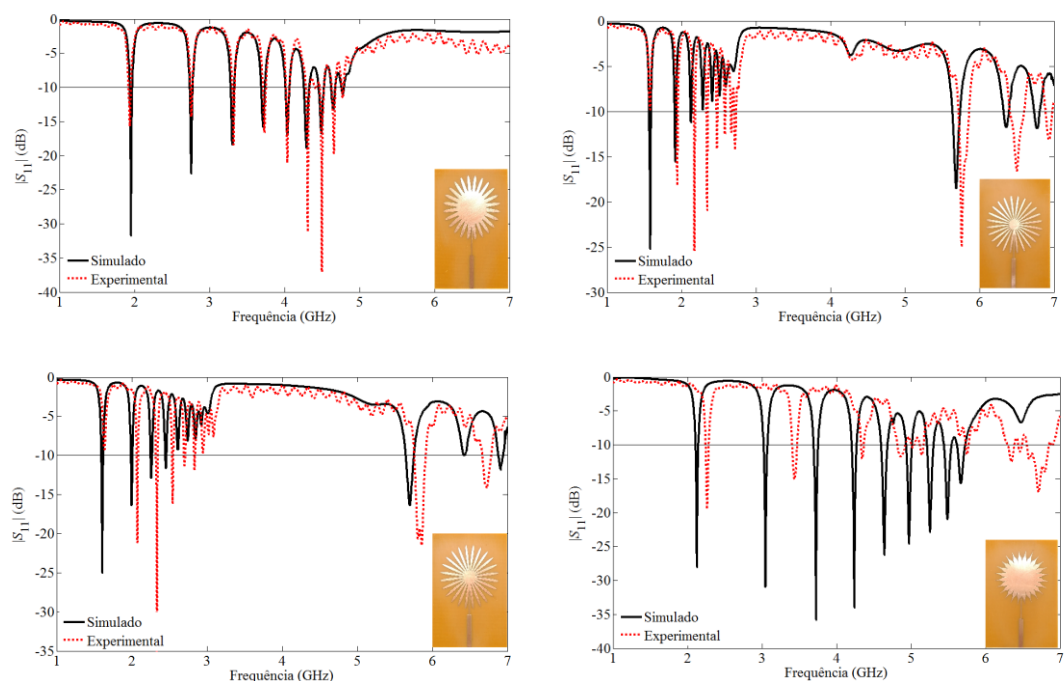


Figura 60 – Resultados simulados e medidos do parâmetro $|S_{11}|$ para os tipos de *patch* com 24 pétalas.

Os resultados simulados e medidos para os protótipos das antenas com 32 pétalas, podem ser observados na Figura 61. Os resultados apresentam boa concordância, com exceção do protótipo da antena do tipo Gielis #2, que em torno de 2,5 GHz, não obteve o mesmo número de ressonâncias simuladas e medidas. A mesma análise, aplica-se aos resultados com 40 pétalas observados na Figura 62.

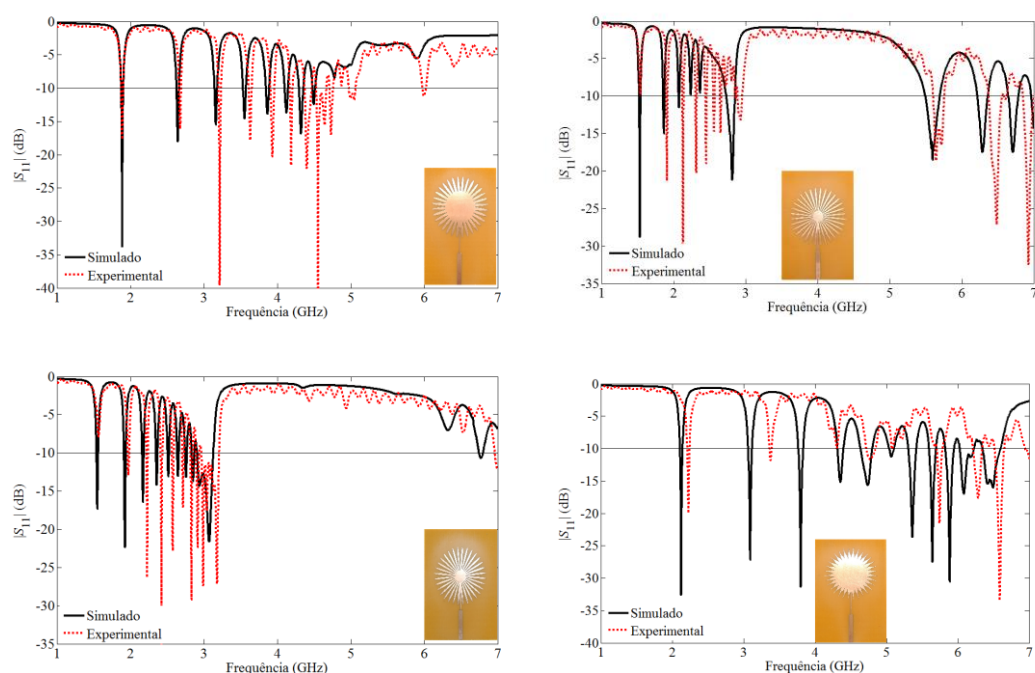


Figura 61 – Resultados simulados e medidos do parâmetro $|S_{11}|$ para os tipos de *patch* com 32 pétalas.

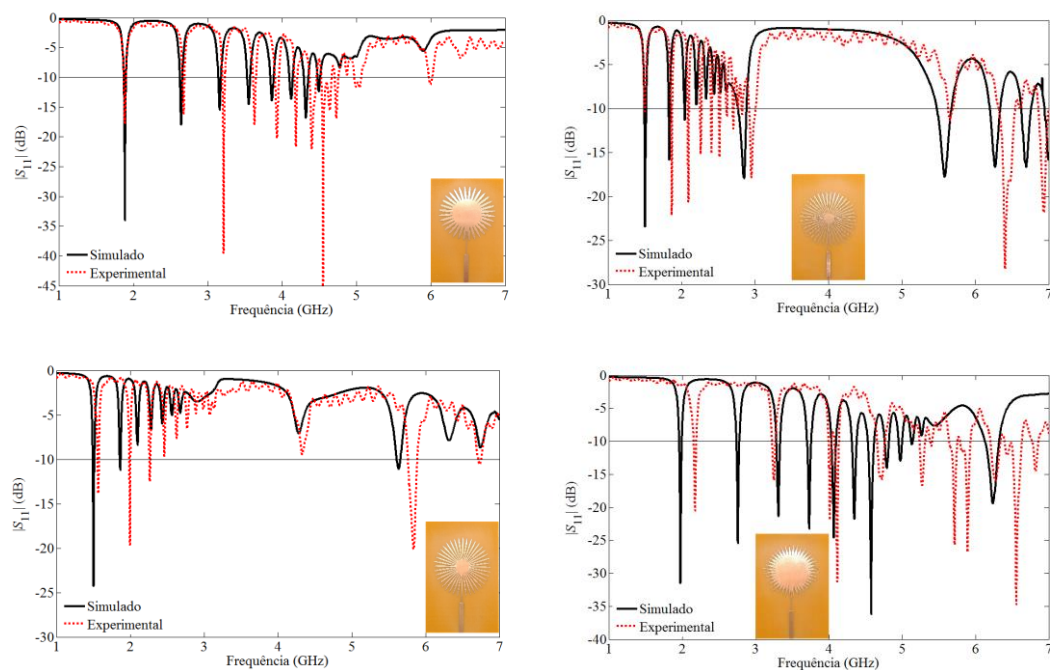


Figura 62 – Resultados simulados e medidos do parâmetro $|S_{11}|$ para os tipos de *patch* com 40 pétalas.

Na Figura 63 está representada a análise paramétrica do número de ressonâncias com a variação no número de pétalas dos elementos *patch* das antenas analisadas. Foram consideradas apenas ressonâncias em -10 dB do coeficiente de reflexão. Observa-se a mesma tendência de incremento no número de ressonâncias com o aumento no número de pétalas para todos os tipos de elementos irradiantes considerados.

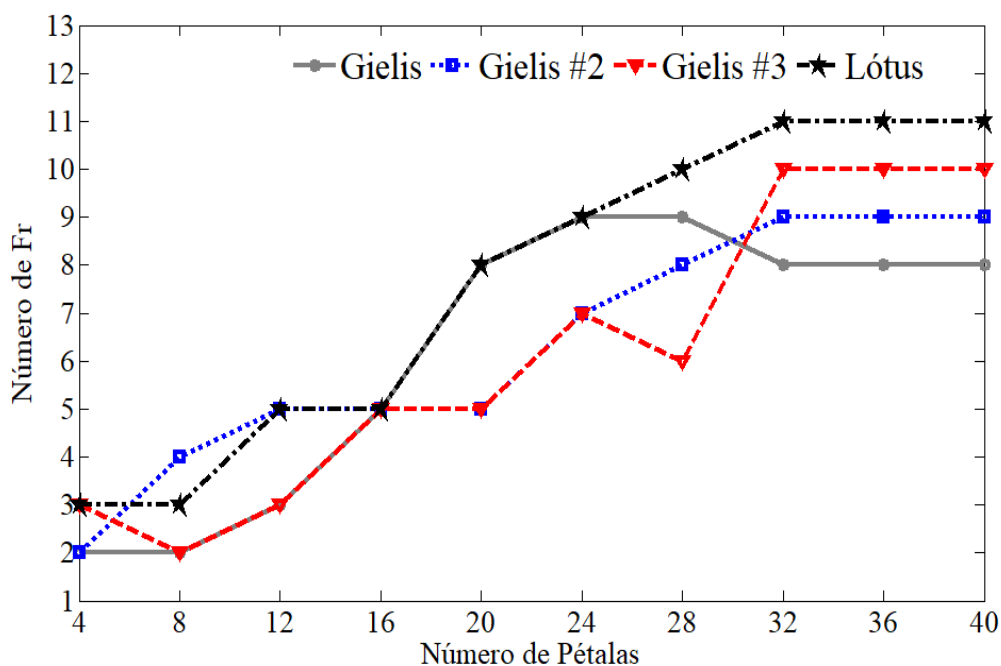


Figura 63 – Análise paramétrica do número de ressonâncias em relação ao número de pétalas dos elementos irradiantes abordados.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o uso de equações polares no projeto de antenas *patch* de microfita. Isso possibilitou a geração de diferentes tipos de elementos irradiantes, que foram desenvolvidos com auxílio de ferramentas de CAD a partir de um *patch* circular convencional.

As antenas foram projetadas considerando o substrato Hitachi, com quatro tipos de elementos irradiantes em formatos de rosáceas, que além do raio, possibilita mais um grau de liberdade no projeto: o número de pétalas. Além disso, um elemento *patch* bioinspirado na flor Anêmona foi utilizado para o projeto de uma antena fabricada em substrato *jeans* para aplicações vestíveis em 3,5 e 5 GHz.

Foram realizadas análises paramétricas da frequência de ressonância e largura de banda em função do raio e do número de pétalas dos elementos irradiantes propostos. Para validar esses resultados, foram fabricados protótipos da antena com *patch* circular e das outras antenas *patch* com quatro pétalas e raio de 20 mm. Após a caracterização experimental, constatou-se uma boa concordância entre os resultados simulados e medidos. Algumas antenas fabricadas apresentaram ressonâncias com potenciais aplicações WLAN em 5,8 GHz.

O protótipo fabricado em substrato *jeans*, para aplicações WiMAX em 3,5 GHz e WLAN em 5,8 GHz, apresentou largura de banda medida de 244 MHz, suficiente para cobrir a faixa WiMAX de 3,4 – 3,6 GHz. A frequência de ressonância, para 5,8 GHz, foi deslocada para uma frequência inferior no resultado medido, no entanto ainda com possíveis aplicações WLAN na faixa 5,15 – 5,35 GHz. Essa diferença entre os resultados simulado e medido desta antena, foi atribuída à variação da permissividade nas frequências de interesse do projeto.

Os resultados das análises paramétricas apresentaram uma tendência de redução da largura de banda e frequência de ressonância com o aumento no número de pétalas. Essa redução foi menor do que a esperada, tendo em vista o aumento nos perímetros dos elementos irradiantes das antenas. Verificou-se que a análise das antenas de Gielis #3 apresentou a maior redução, em termos percentuais, das frequências de ressonâncias para as antenas com o raio de 8 mm. A maior redução da largura de banda, em termos percentuais, foi verificada para as antenas *patch* bioinspiradas na flor de Lótus para o raio de 8 mm.

Uma análise paramétrica do número de ressonâncias em função do número de pétalas foi realizada com os resultados multibanda apresentados pelas antenas projetadas, na faixa de 1 – 7 GHz. Para a validação da análise, foram fabricados protótipos de antenas com 4, 12, 24, 32 e 40 pétalas para cada tipo de *patch* proposto. Verificou-se uma tendência de crescimento do número de ressonâncias com o aumento do número de pétalas para todas as análises.

O uso de elementos irradiantes polares em antenas *patch* resultam em antenas com características multibanda. O número de frequências de ressonância é uma função crescente do número de pétalas.

5.1. Propostas Para Trabalhos Futuros

Propõem-se os seguintes trabalhos futuros:

- A utilização dos dados da análise paramétrica como conjunto de treinamento de redes neurais visando a otimização do projeto de antenas com parâmetros específicos;
- Realização de novas análises paramétricas de antenas com elementos polares considerando-se outros substratos dielétricos;

REFERÊNCIAS

- [1] A. G. D' Assunção Jr, **Uma Nova Proposta de Antena Planar Multibanda para Comunicações Móveis**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2007.
- [2] H. R. O. Ferreira, **Projeto de Antenas Multibanda Integradas para Terminais 4G**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, PA, 2014.
- [3] Q. T. Zhang, Y. C. Jiao, Y. Ding e B. Li, "Design of a Planar Monopole Multiband Antenna With U- and L-shaped Slots," *2011 IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics*, Beijing, 2011, pp. 331-333.
- [4] M. Naser-Moghadasi, R. A. Sadeghzadeh, M. Fakheri, T. Aribi, T. Sedghi e B. S. Virdee, "Miniature Hook-Shaped Multiband Antenna for Mobile Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1096-1099, 2012.
- [5] M. R. Khan, M. M. Morsy, M. Z. Khan e F. J. Harackiewicz, "Dual Band Antenna For Wireless Network (WLAN) Applications," *2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Spokane, WA, 2011, pp. 1397-1400.
- [6] C. Balanis, **Antenna Theory: analysis and design**, 2nd ed., John Willey and & Son, Inc., 1997.
- [7] M. A. Oliveira, **Projeto de Antenas e Superfícies Seletivas de Frequência a Partir de Transformações Polares**, Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, PB, 2017.
- [8] B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, New York: W>H. Freeman and Company, 1977.
- [9] P. F. Silva Júnior, P. H. F. Silva, A. J. R. Serres, J. C. Silva e R. C. S. Freire, "Bio-Inspired Design of Directional Leaf-Shaped Printed Monopole Antennas for 4G 700 MHz Band," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, pp. 1529-1533, 2016.

- [10] P. F. Silva, **Projeto de Antenas Bioinspiradas em Plantas Para Sistemas de Comunicação Sem Fio**, Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, PB, 2015.
- [11] P. F. da Silva, R. C. S. Freire, A. J. R. Serres, P. H. d. F. Silva e J. C. e Silva, "Bio-inspired Antenna for UWB Systems," *2016 1st International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*, Belo Horizonte, 2016, pp. 153-157.
- [12] J. A. Flint, "A Biomimetic Antenna in the Shape of Bat's Ear", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 5, pp. 145-147, Dez. 2006.
- [13] J. N. Cruz et al, "Parametric Study of Printed Monopole Antenna Bioinspired on the Inga Marginata Leaves for UWB Applications". *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.* vol.16, n.1, pp.312-322, 2017. [online]. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-10742017000100312. Acesso em: 14 de agosto de 2017.
- [14] N. A. Lemos, A. N. Silva, H. F. Paiva e P. H. F. Silva, "Four-Leaf Clover UWB Planar Monopole Antenna," *MOMAG 2014: 16 SBMO. Brazil, 1 CD*, 740-744 Agosto 2014.
- [15] I. Gil e R. F. García, "Wearable GPS Patch Antenna on Jeans Fabric," *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, pp. 2019-2022, Shanghai, 2016.
- [16] L. C. M. de Moura, J. d. N. Cruz, A. P. da Costa, P. H. d. F. Silva e J. C. e Silva, "UWB Cotton Leaf Design Microstrip-fed Printed Monopole Antenna," *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, 2015, pp. 1-4.
- [17] Ansoft Corporation, **Ansoft Designer**, ver. 4.0, Ansoft Corporation, Pittsburgh, PA.
- [18] T. Milligan, **Modern antenna design**, New Jersey, USA: Second edition, John Wiley & Sons, Inc., 2005.

- [19] Y. Chen, C. Wang, **Characteristics Modes: theory and applications in antenna engineering modern antenna design**, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [20] W. L. Stutzman, G. A. Thiele. **Antenna Theory and Design**, 3rd ed. New Jersey, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [21] W. L. Stutzman, G. A. Thiele. **Antenna Theory and Applications**, Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2012.
- [22] P. F. Silva, **Arranjos de Antenas Bioinspiradas Desenvolvidas pela Expressão de Gielis**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2017.
- [23] D. Yang, S. Liu e D. Geng, "A Miniaturized Ultra-Wideband Vivaldi Antenna With Low Cross Polarization," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23352-23357, 2017.
- [24] I. F. Costa, **Antenas e Superfícies Seletivas de Frequência Reconfiguráveis para Sistemas de Comunicação Sem Fio**, Dissertação de Mestrado, Universidade federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2009.
- [25] H. Rmili, J. L. Miane, T. Olinga e H. Zangar, "Design of Microstrip-fed Proximity-coupled Conducting-polymer Patch Antenna," *11th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics [ANTEM 2005]*, Saint-Malo, 2005, pp. 1-4.
- [26] A. Foudazi, T. E. Roth, M. T. Ghasr e R. Zoughi, "Aperture-coupled Microstrip Patch Antenna Fed by Orthogonal SIW Line for Millimetre-wave Imaging Applications," in *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 6, pp. 811-817, 5 12 2017.
- [27] J. C. e Silva, D. F. Mamedes, T. d. S. Evangelista e T. R. de Sousa, "Parametric Analysis of Angular Inset-feed in Circular Microstrip Patch Antenna," *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, 2015, pp. 1-5.

- [28] T. V. Barra, **Um Ambiente Evolutivo para Apoio ao Projeto de Antenas de Microfita**, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.
- [29] A. Soffiatti, **Estudo da Atenuação da Onda Eletromagnética em Meios Aquosos Utilizando Técnicas de Micro-ondas**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2014.
- [30] J. H. A. Silveira, **Antena Discreta com Patch Circular Confeccionada Sobre Substrato Dielétrico Cerâmico à Base de Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5** , Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2015.
- [31] H. Pakrasi, **Natural Antennas: Structure & Efficiency**, PARC St. Louis, MO, 2012.
- [32] H. A. M. Silva, **Análise de Antenas de Microfita Bioinspiradas e Fractais**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2017.
- [33] G. Farmer, J. A. Flint, G. Leonard e S. A. Dible, "Measurement of a Biomimetic Antenna in the Shape of a Bat's Ear," *2006 First European Conference on Antennas and Propagation*, Nice, 2006, pp. 1-6.
- [34] G. H. Huff e S. A. Goldberger, "Biologically-Inspired Vascular Antenna Reconfiguration Mechanism," *in Electronics Letters*, vol. 47, no. 11, pp. 637-638, May 26 2011.
- [35] O. Haraz, A. R. Sebak, "Numerical and Experimental Investigation of a Novel Ultrawideband Butterfly Shaped Printed Monopole Antenna With Bandstop Function", *Progress In Electromagnetics Research C*. v. 18, pp. 111 – 121, 2011.
- [36] H. Elkamchouchi, M. Mahmoud, T. ElNozahy e I. Aly, "The Analysis of a New Class of Microstrip Antennas Based on the Idea of Cockroach Antenna," *2008*

International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Nanjing, 2008, pp. 186-189.

[37] K. Ebnabbasi, "A Bio-inspired Printed-Antenna Transmission-Range Detection Systems," *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, vol. 55, nº 3, pp. 193-200, 2013.

[38] M. Fakharian, P. Rezaei e A. Azadi, "A Planar UWB Bat-Shaped Monopole Antena with Dual Band-Notched for WiMAX/WLAN/DSRC," *Wireless Pers Commun*, vol. 81, pp. 881-891, 2015.

[39] A. N. Askarpour, A. Gholipour e R. Faraji-Dana, "A Band-Notched Tulip Antenna for UWB Applications," *2008 38th European Microwave Conference*, Amsterdam, 2008, pp. 881-884.

[40] P. F. Silva Jr., P. H. d. F. Silva e J. C. Silva, "Projeto de Uma Antena Folha para 700 MHz," *MOMAG 2014: 16 SBMO. Brasil, 1 CD*, 740-744, Agosto de 2014.

[41] P. F. Silva Jr., R. C. S. Freire, A. J. R. Serres, P. H. d. F. Silva e J. C. Silva, "Wearable Textile Bioinspired Antenna for 2G, 3G and 4G Systems," *Microwave and Optic Technol. Letters*, vol. 58, nº 12, pp. 2018-2023, 2016.

[42] M. A. de Oliveira *et al.*, "Patch Antenna Bio-inspired on Wayfaring-tree (*Viburnum lantana*) for Applications in 2.4 GHz," *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Águas de Lindoia, 2017, pp. 1-4.

[43] M. Virili, H. Rogier, F. Alimenti, P. Mezzanotte e L. Roselli, "Wearable Textile Antenna Magnetically Coupled to Flexible Active Electronic Circuits," *in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 209-212, 2014.

[44] S. Yan, P. J. Soh e G. A. E. Vandenbosch, "Dual-Band Textile MIMO Antenna Based on Substrate-Integrated Waveguide (SIW) Technology," *in IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 4640-4647, Nov. 2015.

- [45] V. Kumar, "Patch Antenna for Wearable Electronics," *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Mumbai, 2017, pp. 636-640.
- [46] A. Y. I. Ashyap, Z. Z. Abidin, S. H. Dahlan, H. A. Majid, M. R. Kamarudin e R. A. Abd-Alhameed, "Robust Low-profile Electromagnetic Band-gap-based on Textile Wearable Antennas for Medical Application," *2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT)*, Athens, 2017, pp. 158-161.
- [47] R. Raihan, M. S. A. Bhuiyan, R. R. Hasan, T. Chowdhury e R. Farhin, "A Wearable Microstrip Patch Antenna for Detecting Brain Cancer," *2017 IEEE 2nd International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*, Singapore, 2017, pp. 432-436.
- [48] N. R. Rishani, R. M. Shubair e G. Aldabbagh, "On the Design of Wearable and Epidermal Antennas for Emerging Medical Applications," *2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET)*, Beirut, 2017, pp. 1-4.
- [49] C. Hertleer, H. Rogier, L. Vallozzi e L. Van Langenhove, "A Textile Antenna for Off-Body Communication Integrated into Protective Clothing for Firefighters," *in IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 4, pp. 919-925, April 2009.
- [50] S. M. de Holanda, **Estudo e Desenvolvimento de Antenas de Microfita Utilizando Tecido de Malha a Base de Fibras Têxteis Compostas**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2016.
- [51] M. Grilo e F. S. Correra, "Parametric Study of Rectangular Patch Antenna Using Denim Textile Material," In: *Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International. IEEE*, 2013. p. 1-5.
- [52] M. Koohestani, N. Pires e A. K. M. A. A. Skrivervik, "Influence of the Human Body on a New Coplanar-fed UltraWideband Antenna," *6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 316-319, 2011.

- [53] H. R. Khaleel, **Inovation in Wearable and Flexible Antennas**, Ed., Boston: WIT Press, 2015.
- [54] G. A. Cavalcante, **Desenvolvimento de Circuitos Planares sobre Substrato Têxteis**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2014.
- [55] E. K. Kaivanto, M. Berg, E. Salonen, e P.D. Maagt, "Wearable Circularly Polarized Antenna for Personal Satellite Communication and Navigation," *IEEE Trans. Antennas Propagation.*, vol. 59, no. 12, pp. 4490-4496, Dec. 2011.
- [56] Q. Liu e Y. Lu, "CPW-fed Wearable Textile L-shape Patch Antenna," *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, Harbin, 2014, pp. 461-462.
- [57] W. N. N. Wan Marzudi, Z. Zainal Abidin, S. H. Dahlan, K. N. Ramli, H. A. Majid e M. R. Kamarudin, "Rectangular Patch With Partial Ground Wearable Antenna for 2.4 GHz Applications," *2015 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)*, Kuching, 2015, pp. 104-109.
- [58] I. Gil e R. Fernández-García, "Wearable GPS Patch Antenna on Jeans Fabric," *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Shanghai, 2016, pp. 2019-2022.
- [59] I. Gil e R. Fernández-García, "Wearable Embroidered GPS Textile Antenna," *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*, St. Petersburg, 2017, pp. 655-659.
- [60] G. B. Thomas, **Cálculo**. v. 2. São Paulo: Pearson, 2007. 1019p.
- [61] J. Gielis, "Generic Geometric Transformation That Unifies a Wide Range of Natural and Abstratic Shapes". *American Journal of Botany*, p. 333-338, 2003.

[62] S. Anthony, **New nature-inspired antenna improves wireless performance by 6-8x, coming to routers and smartphone soon**. Extreme tech, 11 fev. 2014

[63] A. Company, "The Antenna Company International," Antenna Company , [Online]. Disponível em: www.antennacompany.com. [Acesso em 05 jan 2018].